

# Д Т У ЕШЕТНЕВСКИЕ ТЕНИЯ

ISBN 978-5-86433-339-6



Часть 1  
•  
XXVII

Красноярск • 2023

Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева  
АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
АО «Красноярский машиностроительный завод»

при поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации  
Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС»  
Правительства Красноярского края  
Совета ректоров вузов Красноярского края  
Федерации космонавтики России  
ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система»  
Красноярского регионального отделения ООО «Союз машиностроителей России»  
Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности



**РЕШЕТНЕВСКИЕ  
ТЕНИЯ**

---

*Материалы XXVII Международной научно-практической конференции,  
посвященной памяти генерального конструктора  
ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева  
(08–10 ноября 2023, г. Красноярск)*

В 2 ЧАСТЯХ. ЧАСТЬ 1

Электронное издание

Красноярск 2023

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2023

УДК 629.7  
ББК 30 + 2  
Р47

**Редакционная коллегия:**

Ю. Ю. ЛОГИНОВ (председатель), Е. А. АЧКАСОВА, Ю. Д. АЛАШКЕВИЧ, Е. В. БЕЛЯКОВА,  
Е. Н. ГОЛОВЕНКИН, В. В. ДВИРНЫЙ, В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, В. В. ЗОЛОТАРЕВ, Л. А. КАЗАКОВЦЕВ,  
А. А. КИШКИН, А. В. КУСТОВ, В. А. ЛАПКО, В. А. ЛЕВКО, А. Ю. ЛИТВИНЧУК, К. Ю. ЛОБКОВ,  
И. А. МИСИНЕВА, А. Е. МИХЕЕВ, Е. А. МОРОЗОВ, А. В. МУРЫГИН, В. П. НАЗАРОВ, В. И. ОРЛОВ,  
А. С. ПАРШИН, О. Е. ПОДВЕРБНЫХ, Л. В. РУЧКИН, К. В. САФОНОВ, С. И. СЕНАШОВ, В. Г. СИДОРОВ,  
А. А. СТУПИНА, Г. А. СУБОЧ, О. В. ТАСЕЙКО, М. Н. ФАВОРСКАЯ, В. Х. ХАНОВ

**Под общей редакцией**

доктора физико-математических наук Ю. Ю. ЛОГИНОВА

**Решетневские чтения** [Электронный ресурс] : материалы XXVII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–10 нояб. 2023, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 44,1 МБ). – Систем. требования : Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2023. – Ч. 1. – Режим доступа: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-339-6

Сборник содержит материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения», посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, в которых представлены результаты исследований ученых и специалистов предприятий и организаций аэрокосмической отрасли, преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов высших учебных заведений Российской Федерации и стран ближнего и дальнего зарубежья.

Сборник рассчитан на научных сотрудников, работников промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

В статьях сохранен авторский стиль изложения.

*Информация для пользователя:* в программе просмотра навигация осуществляется с помощью панели закладок слева; содержание в файле активное.

**УДК 629.7  
ББК 30 + 2**

ISBN 978-5-86433-339-6



Подписано к использованию: 08.11.2023. Объем: 44,1 МБ. С 848/23.

Корректор *П. С. Бороздов*

Макет и компьютерная верстка *М. А. Светлаковой*

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.  
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31.  
E-mail: rio@mail.sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.



*Уважаемые коллеги!*

**Приветствуем вас на XXVII Международной  
научно-практической конференции «Решетневские чтения»!**

Освоение околоземного пространства и далеких планет невозможно без развития науки и образования. Именно поэтому в Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева вновь начинается свою работу Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения», посвященная памяти выдающегося ученого и конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева, в рамках которой участники конференции обсуждают новейшие достижения в ракетно-космической отрасли.

Михаил Федорович Решетнев – ярчайший представитель той плеяды ученых и организаторов производства, которых в нашей стране принято называть первопроходцами космических трасс. М. Ф. Решетнев остался в нашей памяти как величайший ученый современности, как человек, внесший неоценимый вклад в развитие общества. Он был талантливейший организатор, автор множества работ и открытий в области спутниковых коммуникаций, признанный мировой авторитет.

На конференции специалисты-практики, представители базовых предприятий и научного сообщества, студенты профильных направлений подготовки смогут обменяться опытом в области высоких технологий, обсудить перспективы дальнейшей работы, начать совместные проекты. За 27 лет своего существования конференция стала основой для интеграции образования, науки и производства, что способствует развитию науки и техники в современном мире.

Конференция проводится ежегодно. Дата проведения конференции приурочена ко дню рождения академика М. Ф. Решетнева – **10 ноября**.

Уважаемые участники! Желаем вам успешных выступлений, плодотворных дискуссий и новых научных открытий!

*Ректор Сибирского  
государственного  
университета науки  
и технологий  
имени академика  
М. Ф. Решетнева  
Э. Ш. Акбулатов*

*Генеральный директор  
АО «Информационные  
спутниковые системы»  
имени академика  
М. Ф. Решетнева»  
Е. А. Нестеров*

*Генеральный  
директор  
АО «Красмаш»  
А. Ф. Гаврилов*



**Секция**

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ПРОЕКТЫ»**

УДК 539.3

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ СПУТНИКА 1U CUBESAT\*

А. В. Азин<sup>1\*</sup>, С. В. Пономарев<sup>1</sup>, С. В. Рикконен<sup>1</sup>, А. В. Васильев<sup>1</sup>, С. Б. Сунцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*Проведены анализ напряженно-деформированного состояния и оценка долговечности печатной платы космического аппарата 1U CubeSat с учетом нестационарного тепловыделения при функционировании спутника на орбите.*

*Ключевые слова: моделирование, печатная плата, напряженно-деформированное состояние, космический аппарат, надежность.*

## PREDICTING THE DURABILITY OF PRINTED BOARDS FOR 1U CUBESAT SATELLITE

A. V. Azin<sup>1</sup>, S. V. Ponomarev<sup>1</sup>, S. A. Ponomarev<sup>1</sup>, A. V. Vasilyev<sup>1</sup>, S. B. Suntsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research institute of Applied Mathematics and Mechanics Tomsk State University  
36, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*An analysis of the stress-strain state and an assessment of the durability of the printed circuit board of the 1U CubeSat spacecraft are carried out, taking into account the non-stationary heat release during the operation of the satellite in orbit.*

*Keywords: modeling, printed circuit board, stress-strain state, spacecraft, reliability.*

Малые спутники типа CubeSat привлекательны низкой величиной затрат на их разработку, изготовление и выведение на орбиту. Малые спутники такого типа широко используются в образовательном процессе, дистанционном зондировании Земли, мониторинге чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий, для отработки новых технологий и систем, в научных исследованиях космического пространства и Земли [1].

Большинство проектов «CubeSat» используют пассивные способы управления тепловым режимом. Внешние элементы спутника подвергаются тепловым воздействиям в диапазоне температур от  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  при переходе с теневой стороны орбиты на освещенную, причем скачок температур происходит в течении нескольких минут. Такой перепад температур может привести к сбоям в работе или выходу из строя бортовой аппаратуры [2].

В данной работе численно исследуется напряженно-деформированное состояние космического аппарата при учете внутренних и внешних нестационарных тепловых нагрузок в соответствии с ме-

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0036).

тодической, приведенной в [3]. Для задания свойств материала припоя ПОС-60 использовалась вязкопластическая модель Ананда [4]. Долговечность паяных соединений печатной платы (ПП) бортовой аппаратуры спутника оценивалась по модели Дарво [5]:

$$N = K_1 \left( \frac{\Delta W_{\text{ave}}}{W_{\text{ref}}} \right)^{K_2} + \frac{\alpha}{K_3 \left( \frac{\Delta W_{\text{ave}}}{W_{\text{ref}}} \right)^{K_4}}$$

где  $N$  – усталостная долговечность, выраженная в количестве циклов,  $\Delta W_{\text{ave}}$  – усредненная плотность рассеиваемой энергии за усталостный цикл,  $\alpha$  – расстояние, которое необходимо пройти трещине, чтобы произошло разрушение паяного соединения ( $\alpha = 6,7 \cdot 10^{-6}$  м),  $K_1, K_2, K_3, K_4$  и  $W_{\text{ref}}$  – это материальные константы (для материала припоя ПОС-60:  $K_1 = 13173$ ;  $K_2 = 1,45$ ;  $K_3 = 7,62 \cdot 10^{-9}$  м;  $K_4 = 1,12$ ;  $W_{\text{ref}} = 6894,76$  Дж/м<sup>3</sup>).

Цифровая модель конструкции спутника типа Cubesat приведена на рис. 1. Данные теплового анализа спутника взяты из сторонних исследований [6,7]. Для анализа НДС печатной платы и оценки долговечности паяных соединений выбрана верхняя плата бортового оборудования, содержащая компоненты (BGA чипы) с максимальным перепадом температур при установившемся режиме функционирования на орбите в диапазоне от 40 до 106 °С (рис. 2). Анализ результатов моделирования НДС платы показал, что наибольшие напряжения возникают в угловых паяных соединениях чипов, в местах соединения припоя с контактными площадками на компоненте. На рис. 2, б приведена зависимость энергии диссипации в самом напряженном паяном соединении от времени функционирования спутника. Таким образом, при данной частоте теплового цикла время работы ПП составит  $4,6 \cdot 10^3$  циклов.

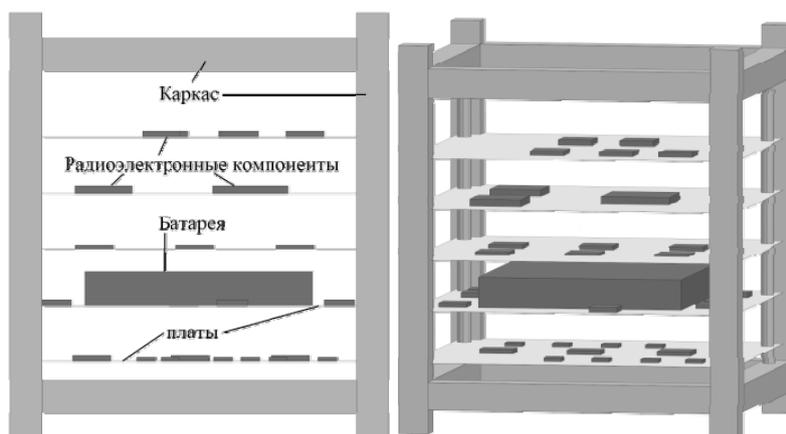


Рис. 1. Конструкция спутника типа Cubesat, боковые панели не отображены

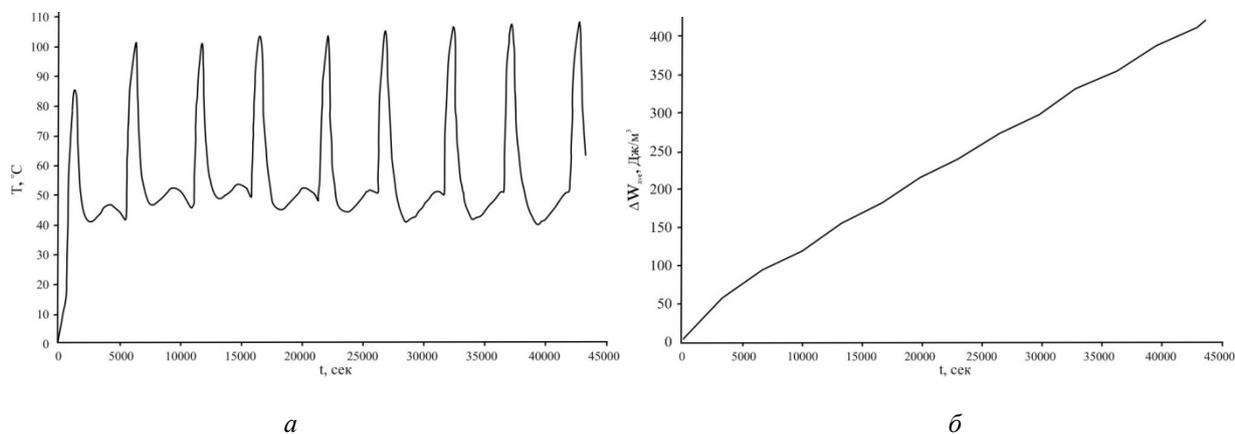


Рис. 2. Моделирование:

- а – зависимость температуры корпуса компонента от времени функционирования спутника;
- б – зависимость энергии диссипации в паяном соединении от времени функционирования спутника

### Библиографические ссылки

1. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты новое направление космической деятельности // Международный научно-исследовательский журнал, 2018. № 12 (78). С.84–91. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>.
2. Храмов Д. А. Миниатюрные спутники стандарта CubeSat // Космічна наука і технологія, 2009. Т. 15. № 3. С. 20–31.
3. Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем / А. В. Азин, Н. Н. Марицкий, С. В. Пономарев и др. // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2022. № 76. С. 43–56. DOI: [10.17223/19988621/76/4](https://doi.org/10.17223/19988621/76/4).
4. A compilation of Anand parameters for selected SnPb and Pb-free solder alloys / Z. E. Johnson // Technical Report, 2012. DOI: [10.13140/RG.2.2.10895.00166](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10895.00166).
5. A model of BGA thermal fatigue life prediction considering load sequence effects/ W. Hu, Y. Li, Y. Sun and al. // Materials, 2016. no. 9, V. 860. DOI: [10.3390/ma9100860](https://doi.org/10.3390/ma9100860).
6. Тепловое состояние малого спутника при различной плотности расположения электронных плат / С. В. Белов, А. В. Бельков, А. П. Жуков и др. // Математика и механика. 2023. № 82. С. 66–81.
7. Проектирование системы электропитания наноспутников семейства SAMSAT / Д. Д. Давыдов, А. А. Соболев, Е. В. Устюгов и др. // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 459–465.

### References

1. Gansvind I. N. [Small spacecraft a new direction in space activities] *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2018, no. 12 (78), p. 84–91, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>. (In Russ.).
2. Khramov D. A. [Miniature CubeSats] *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. 2009, V. 15, no. 3, p. 20–31. (In Russ.).
3. Azin A. V., Maritsky N. N., Ponomarev S. V., Rikkonen S. V. [Durability prediction of chips soldered joints] *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2022, № 76, p. 43–56, DOI: [10.17223/19988621/76/4](https://doi.org/10.17223/19988621/76/4). (In Russ.).
4. Johnson Z. E. A compilation of Anand parameters for selected SnPb and Pb-free solder alloys. *Technical Report*, 2012, DOI: [10.13140/RG.2.2.10895.00166](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10895.00166).
5. Hu W., Li Y., Sun Y., Mosleh A. A model of BGA thermal fatigue life prediction considering load sequence effects. *Materials*, 2016. no. 9, V. 860, DOI: [10.3390/ma9100860](https://doi.org/10.3390/ma9100860).
6. Belov S.V., Bel'kov A.V., Zhukov A.P., Pavlov M.S., Ponomarev S.V. [A thermal state of a small satellite at various packing density of electronic circuit boards] *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2023, no. 72, p. 43–56, DOI: [10.17223/19988621/82/6](https://doi.org/10.17223/19988621/82/6). (In Russ.).
7. Davydov D. D., Sobolev A. A., Ustyugov E. V., Shafran S. V. [Proektirovanie sistemy elektropitaniya наноспутников семейства SAMSAT]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016, T. 59, no. 6, p. 459–465. (In Russ.)

УДК 536.3 + 629.783

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПУТНИКА 1U CUBESAT ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ НА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКЕ\*

А. В. Бельков, С. В. Белов, А. П. Жуков, М. С. Павлов, С. В. Пономарев

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36  
E-mail: belovsv@niipmm.tsu.ru

*Рассмотрено тепловое состояние космического аппарата 1U CubeSat при нестационарном тепловыделении на электронных компонентах полезной нагрузки.*

*Ключевые слова: CubeSat, космический аппарат, теплопроводность, тепловое состояние, излучение, форм-фактор.*

## 1U CUBESAT THERMAL STATE UNDER NONSTATIONARY HEAT GENERATION FROM A PAYLOAD

A. V. Belkov, S. V. Belov, A. P. Zhukov, M. S. Pavlov, S. V. Ponomerev

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: belovsv@niipmm.tsu.ru

*The thermal state CubeSat-type spacecraft frame structure under nonstationary heat generation from a payload electronic element is considered.*

*Keywords: CubeSat, spacecraft, thermal conductivity, thermal state, emission, form-factor.*

**Введение.** CubeSat – стандарт малых космических аппаратов (КА), разработанный в 1999 году Калифорнийским политехническим и Стэнфордским университетами [1]. В настоящее время уровень развития КА типа CubeSat позволяет решать широкий круг задач [2], [3]. Обычно, CubeSat КА выводятся на низкие околоземные орбиты с расчетным сроком активного существования, не превышающим одного года. Как правило, CubeSat КА не имеют активной системы терморегулирования, поэтому важнейшей проблемой для таких КА является обеспечение теплового режима электронных компонент. В данной работе численно исследуется тепловое состояние космического аппарата стандарта CubeSat с форм-фактором корпуса 1U. На рис 1. показан корпус КА 1U CubeSat без внешних панелей, с платами и, расположенными на них электронными компонентами. В соответствии со стандартом [1]: размеры корпуса 100×100×100 мм; расстояние между платами 15 мм.

**Постановка задачи.** КА, занимающий объем  $V$  и имеющий внешние ( $S_{out}$ ) и внутренние ( $S_{in}$ ) свободные (не контактирующие) поверхности. КА движется по круговой орбите в плоскости земного экватора на высоте 300 км. Ось  $Z$  системы координат КА направлена перпендикулярно плоскости экватора, ось  $Y$  направлена к центру Земли. Тепловое состояние КА в момент времени  $t$  описывается нестационарным уравнением теплопроводности

$$c\rho T_{,t} = k\Delta T + q_V,$$

с начальными условиями и с граничными условиями

$$T(t=0) = T_0, (x,y,z) \in V,$$

\* Представленная работа выполнена при поддержке Программы развития ТГУ («Приоритет 2030»).

$$k \cdot T_n = q_{rad(out)}, (x,y,z) \in S_{out}, k \cdot T_n = q_{rad(in)}, (x,y,z) \in S_{in}$$

где  $T = T(t,x,y,z)$  – температура материала КА в момент времени  $t$  в точке с координатами  $x, y, z$ ;  $c = c(x,y,z)$ ,  $\rho = \rho(x,y,z)$  и  $k = k(x,y,z)$  – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность материала;  $q_V = q_V(x,y,z)$  – плотность внутренних тепловых источников;  $q_{rad(out)}$  и  $q_{rad(in)}$  – плотности потоков излучения от внешних и внутренних источников поглощенных свободными поверхностями. Величина  $q_{rad(out)}$  определяется: излучением Солнца ( $q_{sun}$ ), отражением солнечного излучения от Земли ( $q_{alb}$ ), тепловым излучением Земли ( $q_{earth}$ ), собственным излучением КА ( $q_{sat}$ ) и имеет вид:

$$q_{rad(out)} = q_{sun} + q_{alb} + q_{earth} - q_{sat},$$

где  $q_{sun} = \alpha_{out} Q_{sun} (\bar{n} \cdot \bar{n}_{sun}) \varphi$ ,  $q_{alb} = \alpha_{out} Q_{sun} \Phi_{sat-earth} b$ ,  $q_{earth} = \alpha_{out} Q_{earth} \Phi_{sat-earth}$ ,  $q_{sat} = \sigma_0 (\varepsilon_{out} T^4 - \alpha_{out} T_\infty^4)$ ,  $Q_{sun}$  – Солнечная постоянная, 1367 Вт/м<sup>2</sup>;  $\bar{n}$  – вектор нормали к внешней поверхности корпуса КА;  $\alpha_{out}$  – коэффициент поглощения внешней поверхности корпуса КА;  $\bar{n}_{sun}$  – вектор, направленный к Солнцу;  $\varphi$  – параметр выражающий затенение поверхности (затенение  $\varphi = 0$ , нет затенения  $\varphi = 1$ ),  $\Phi_{sat-earth}$  – фактор видимости;  $b$  – коэффициент альbedo,  $b = 0.3$ ,  $Q_{earth}$  – плотность инфракрасного излучения Земли, 237 Вт/м<sup>2</sup>,  $T_\infty$  – температура излучения открытого космоса, 2.7°K,  $\varepsilon_{out}$  – коэффициент излучения внешней поверхности корпуса КА. Величина плотности потока энергии от внутренних источников  $q_{rad(in)}$  имеет вид:

$$q_{rad(in)}(x_i, y_i, z_i) = -\psi_i.$$

Расчет теплообмена излучением внутри корпуса КА с учетом многократного поглощения и отражения является очень сложной задачей. Поэтому в данной работе используется широко распространенный подход, описанный в [4], в котором поверхности условно считаются диффузно-серыми. Для таких поверхностей коэффициенты излучения  $\varepsilon$  и поглощения  $\alpha$  полагаются равными. Собственное излучение КА представляется в виде:

$$q_{sat} = \sigma_0 (\varepsilon_{out} T^4 - \alpha_{out} T_\infty^4),$$

где  $T_\infty$  – температура излучения открытого космоса, 2.7 °K,  $\varepsilon_{out}$ ,  $\alpha_{out}$  – коэффициенты излучения и поглощения внешней поверхности корпуса КА.

Численная реализация задачи осуществлялась с помощью программного комплекса Siemens NX с применением метода конечных элементов. Количество элементов в конечно-элементной модели, число лучей, необходимых для расчета факторов видимости, определялись из расчетов по определению сходимости решения задачи. Конечно-элементная модель КА, соответствующая конструкции, показанной на рис. 1, содержала 20134 элемента. При расчете лучистого теплообмена использовался метод Монте-Карло и с каждой грани объемного элемента, принадлежащей поверхности, исходило по 400 лучей.

**Результаты.** Исходные данные по нестационарному тепловыделению на электронных компонентах взяты из [5]. Расчетные значения температур приведены на рис. 2.

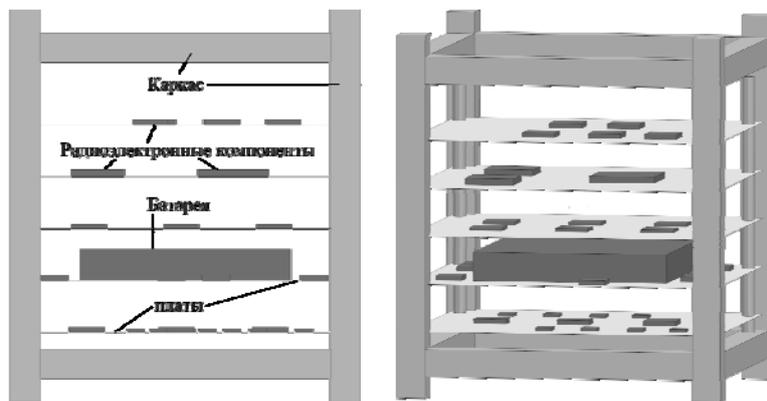


Рис. 1. Расположение плат, радиоэлектронных компонент и аккумуляторной батареи

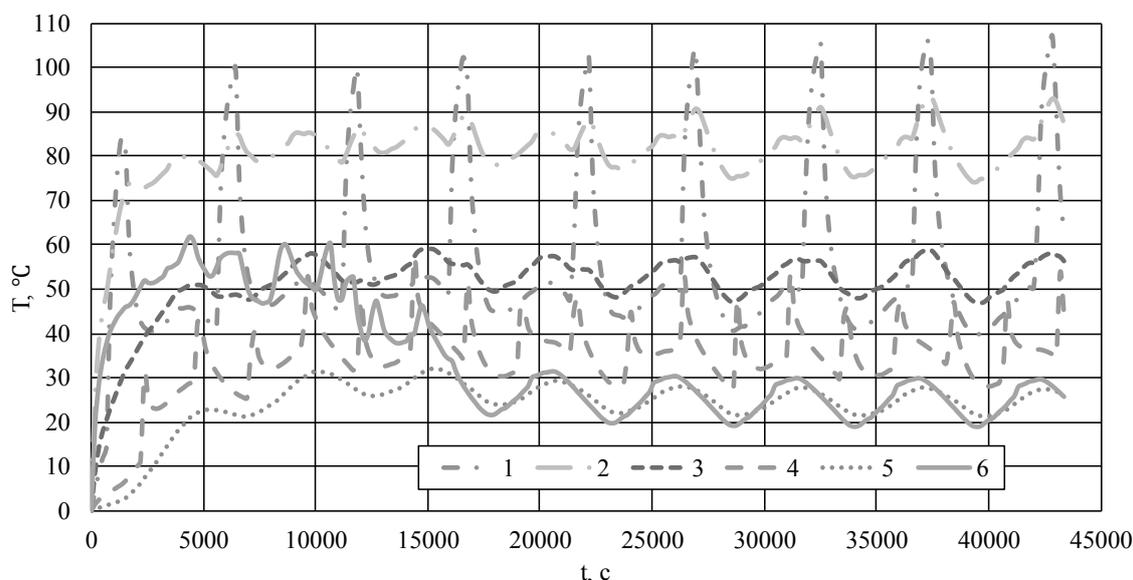


Рис. 2. Температура:

1 – передатчик; 2 – приемник; 3 – компьютер; 4 – система навигации;  
5 – система электропитания; 6 – система управления движением

### Библиографические ссылки

1. PC/104 Pluse Specification v. 2.0. 2003. 28 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://resources.winsystems.com/specs/PC104PlusSpec.pdf> (дата обращения: 07.09.2022)
2. CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges / N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. no. 22(3). pp. 1839–1862.
3. Measurement of cosmic radiation in LEO by 1U CubeSat / P. Kovar, M. Sommer, D. Matthiae, [et. al.] // Radiation Measurements. 2020. no. 139. Art. 106471.
4. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: пер с англ. справ. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
5. Проектирование системы электропитания наноспутников семейства SAMSAT / Д. Д. Давыдов, А. А. Соболев, Е. В. Устюгов и др. // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 459–465.

### References

1. PC/104 Pluse Specification v. 2.0. 2003. 28 p. Available at: <https://resources.winsystems.com/specs/PC104PlusSpec.pdf> (accessed 07.09.2022)
2. CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges / N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. no. 22(3). pp. 1839–1862.
3. Measurement of cosmic radiation in LEO by 1U CubeSat / P. Kovar, M. Sommer, D. Matthiae, [et. al.] // Radiation Measurements. 2020. no. 139. Art. 106471.
4. Wong H.Y. (1977) Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers. London and New York: Longman.
5. Davydov D. D., Sobolev A. A., Ustyugov E. V., Shafran S. V. [Proektirovanie sistemy elektropitaniya nanospjutnikov semejstva SAMSAT]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016, T. 59, no. 6, p. 459–465. (In Russ.)

© Бельков А. В., Белов С. В., Жуков А. П., Павлов М. С., Пономарев С. В., 2023

УДК 629.7.022

## КОНСТРУКТИВНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ В ОТСЕКЕ, СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВКИ И СВЯЗЕЙ ПО БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

А. А. Беляков<sup>1\*</sup>, А. И. Шулепов<sup>2</sup>, В. М. Папазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва  
Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, 4а

\*E-mail: jake.dunn@inbox.ru

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34а

*В работе рассматривается вопрос рационального размещения приборов в отсеке космического аппарата с целью снижения массы и длины коммуникаций. Вводится понятие конструктивной совместимости приборов. Описываются пути её обеспечения.*

*Ключевые слова: бортовая аппаратура, бортовая кабельная сеть, компоновка приборов, трассировка коммуникаций, космический аппарат, конструктивная совместимость.*

## STRUCTURAL COMPATIBILITY OF ON-BOARD EQUIPMENT IN COMPARTMENT, REACHING PROCEDURES, OPTIMIZATION OF LAYOUT AND LEADS USING THE ON-BOARD CABLE SYSTEM

A. A. Belyakov<sup>1\*</sup>, A. I. Shulepov<sup>1</sup>, V. M. Papazov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>S. P. Korolev Rocket and Space Public Corporation «Energia»  
4a, Lenin str., Korolev, Moscow Region, 141070, Russian Federation

\*E-mail: jake.dunn@inbox.ru

<sup>2</sup>Korolev Samara National Research University  
34a, Moskovskoe Shosse str., Samara, 443086, Russian Federation

*In the article, there is a review on the problem of equipment layout in spacecraft compartment that has a goal to decrease mass and longitude of leads. The concept of structural compatibility of equipment has been presented. Ways to reach it have been described.*

*Keywords: on-board equipment, on-board cable system, equipment layout, leads laying, spacecraft, structural compatibility.*

При разработке компоновок приборов в отсеках космических аппаратов необходимо выполнять большое количество разнородных технических требований. Задача размещения приборов по этой причине обладает высокой трудоёмкостью, поэтому уже долгое время предпринимаются небезуспешные исследования по автоматизации работ и повышению производительности труда инженера-конструктора [1]. Отдельного внимания заслуживает вопрос минимизации веса коммуникаций благодаря рациональному размещению приборов. Задача разработки методики компоновки бортовой аппаратуры с оптимизацией бортовой кабельной сети имеет повышенную сложность по сравнению с другими задачами в данной области научных исследований, так как она является интегральной и должна решаться при неполных исходных данных. В частности, на момент начала компоновки могут быть ещё не доступны схемы подключений приборов, например. Поэтому для решения данной задачи рассматривались методы, используемые на раннем этапе конструкторско-технологической подготовки производства при планировании монтажей [2]. Если по бортовым системам известны схемы подключений, то становится возможным провести оптимизацию трассировки на графе, однако для этого в качестве исходных данных требуется готовая схема размещения приборов [3].

Чтобы преодолеть описанные выше трудности, предлагается в силу отсутствия схемной конструкторской документации создавать накопительную базу данных по подключениям приборов с класси-

фикацией по системам и конкретным типам приборов. Для предприятий с многолетним опытом разработки космической техники источником информации может стать конструкторская документация на израсходованную материальную часть, которую следует обрабатывать методом реверс-инжиниринга, учитывая при организации процесса нюансы, которые были описаны ранее в работе [4].

Далее становится возможным задавать связи между приборами. Однако, в отличие от стадии эскизного проекта на стадии технического проекта или в начале разработки рабочей конструкторской документации целесообразно руководствоваться в том числе габаритными, монтажными, эргономическими, массо-центровочными требованиями, явно предъявляемыми к компоновке приборов в технических заданиях на составные части систем.

Чтобы добиться максимального эффекта при выполнении требований, разрабатываемые приборы должны иметь конструктивную совместимость – свойство, которое определяется множеством технических характеристик и при совместном использовании приборов в отсеке обеспечивает достижение наиболее рациональных объёмно-массовых, энергетический и т. д. компоновочных решений. Обеспечить конструктивную совместимость предлагается путём установления единых требований к конструкции и форме креплений приборов, унификацией габаритных и присоединительных размеров, форм и размеров зон прокладки кабелей.

Путём реверс-инжиниринга разрабатываются математические и твердотельные модели зон размещения приборов и трассировки бортовой кабельной сети. Последние должны быть расположены по двум противоположным или четырём сторонам корпуса отсека изделия, или должны быть равномерно распределены на днище, – такой подход позволяет формализовать топологию трасс и организовать процесс вычисления координат размещения приборов с помощью матриц связей и радиус-векторов, обеспечивая конструктивную совместимость.

Таким образом, при систематизации конструкторских работ в части разработки компоновки отсеков космических аппаратов возникают целевые функции, использующие в качестве критериев эффективности минимум массы и длины коммуникаций, минимум отклонения центра масс отсека от заданного положения, отсутствие пересечений объектов, минимум энергетических затрат рабочего при монтаже приборов в цехе и т. д. Для их увязки при разработке электронных геометрических моделей установок следует предусматривать конструктивную совместимость приборов, а при моделировании задачи их размещения пользоваться матрично-топологическими методами.

### Библиографические ссылки

1. Гаврилов В. Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 137 с.
2. Бодрышев С. В. Методы пространственной компоновки на основе функциональных зависимостей эксплуатационных параметров. М.: МАИ, 2006. 167 с.
3. Агафонов Д. В., Воробьев Ю. А., Осокин Ю. В. Метод оптимизации монтажа бортовой кабельной сети на изделиях ракетно-космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2013. №1 (70). С. 88-94.
4. Беляков А. А., Шулепов А. И. Проблемы практики реверс-инжиниринга космических аппаратов // XXV Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения», посвящённая памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнёва. 2021. Ч. 1. С. 8-9.

### References

1. Gavrilov V. N. *Automatized layout of spacecraft compartments*. M.: Machinery, 1988. P. 137.
2. Bodrishev S.V. *Methods of space configuring based on functional dependencies of operating parameters*. M.: MAI, 2006. P. 167.
3. Agafonov D. V., Vorobiev Yu.A., Osokin Yu.V. *On-board cable system mounting optimization method for rocket and space vehicles* // Kosmonavtika i raketostroenie. 2013. №1 (70). P. 88-94.
4. Belyakov A. A., Shulepov A.I. *Problems of spacecraft reverse engineering practice* // XXV International scientific conference “Reshetnev Readings”. 2021. Part 1. P. 8-9.

© Беляков А. А., Шулепов А. И., Папазов В. М., 2023

УДК 629.7

## УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРАЕКТОРИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ СХЕМЫ ТАНДЕМ

В. А. Бордачев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: vladimir27032001@mail.ru

*Проведен анализ коэффициента аэродинамического лобового сопротивления со сферическим притуплением головного обтекателя при симметричном обтекании. Выведены уравнения для расчета лобового сопротивления ракеты-носителя конструктивно-компоновочной схемы тандем.*

*Ключевые слова: коэффициент аэродинамического лобового сопротивления, ракета-носитель, ракета.*

## REFINEMENT OF THE DRAG COEFFICIENT WHEN CALCULATING THE TRAJECTORY OF THE TANDEM LAUNCH VEHICLE

V. A. Bordachev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: vladimir27032001@mail.ru

*The analysis of the coefficient of aerodynamic drag with spherical blunting of the head fairing with symmetrical flow is carried out. The equations for calculating the drag of the launch vehicle of the tandem design and layout scheme are derived.*

*Keywords: aerodynamic drag coefficient, launch vehicle, rocket.*

При выведении космических аппаратов на орбиты искусственного спутника Земли одной из основных задач является обеспечение минимума энергетических затрат. Это позволяет увеличить долю полезной нагрузки в общем весовом балансе космического аппарата (КА) и тем самым повысить эффективность выполнения целевых программ космических миссий.

Определение энергетически оптимального управления вектором тяги двигательной установки на активных участках выведения, где обеспечивается разгон космического аппарата и достижение заданных орбитальных параметров, является одной из основных задач динамики полета КА [1].

Следует отметить, что определение оптимальной программы управления ракетой-носителем с работающей двигательной установкой классическими методами, в отличие от решения вариационных задач управления КА на орбитальных участках и при спуске в атмосфере, сопряжено с рядом дополнительных сложностей, связанных со спецификой динамики полета КА в условиях действия на него совокупности ракетодинамических, аэродинамических, гравитационных, кориолисовых и центробежных сил [2–3].

В данной статье описан приближенный метод оценки коэффициента аэродинамического лобового сопротивления на активных участках траектории вывода на орбиту КА.

Рассматривается задача нахождения численного значения коэффициента аэродинамического лобового сопротивления ракеты-носителя конструктивно-компоновочной схемы тандем, на различных участках траектории вывода полезной нагрузки в зависимости от числа Маха.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента аэродинамического лобового сопротивления от числа Маха при угле атаки  $\alpha = 0^\circ$  с сферическим притуплением у головного обтекателя [4].

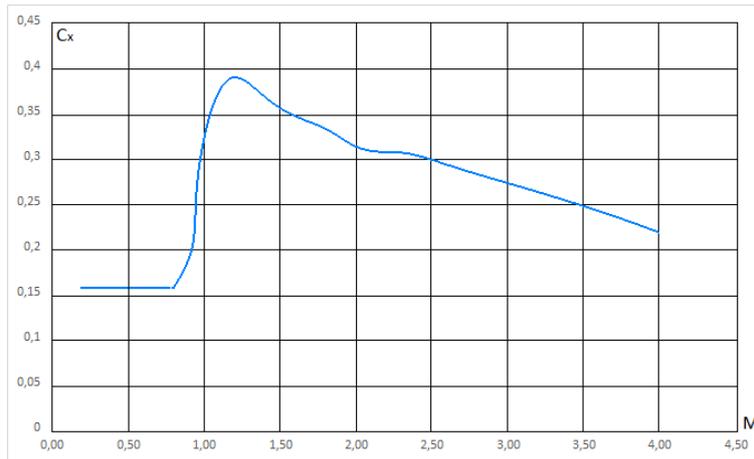


Рис. 1. Зависимость коэффициента аэродинамического лобового сопротивления от числа Маха.

График (рис. 1) разобьём на интервалы и составим зависящие уравнения (1)

$$\begin{cases} C_x = 0.158 & 0.1 \leq M \leq 0.8 \\ C_x = 0.137 \cdot M^2 + 0.086 \cdot M + 0.000898 & 0.8 \leq M \leq 0.9 \\ C_x = 1.35 \cdot M - 1.025 & 0.9 \leq M \leq 1.0 \\ C_x = -0.925 \cdot M^2 + 2.335 \cdot M - 1.085 & 1.0 \leq M \leq 1.4 \\ C_x = -0.0917 \cdot M + 0.4993 & 1.4 \leq M \leq 2.0 \end{cases} \quad (1)$$

На основе предложенных уточнений коэффициента лобового сопротивления была составлена программа расчета характеристик траектории ракеты-носителя при выводе полезной нагрузки на низкую опорную орбиту [5]. Уточнение значений коэффициента лобового сопротивления позволило скорректировать основные массово-баллистические характеристики ракеты-носителя (значение истинной скорости полета, высоту орбиты, массу ракеты и др.). На примере ракеты-носителя «Зенит» со стартовой массой 444 тонны и полезным грузом 13 тонн выигрыш по высоте, например, составил около 1 % (или 130 кг).

Расчеты траектории вывода на орбиту полезного груза представлены на рис. 2.

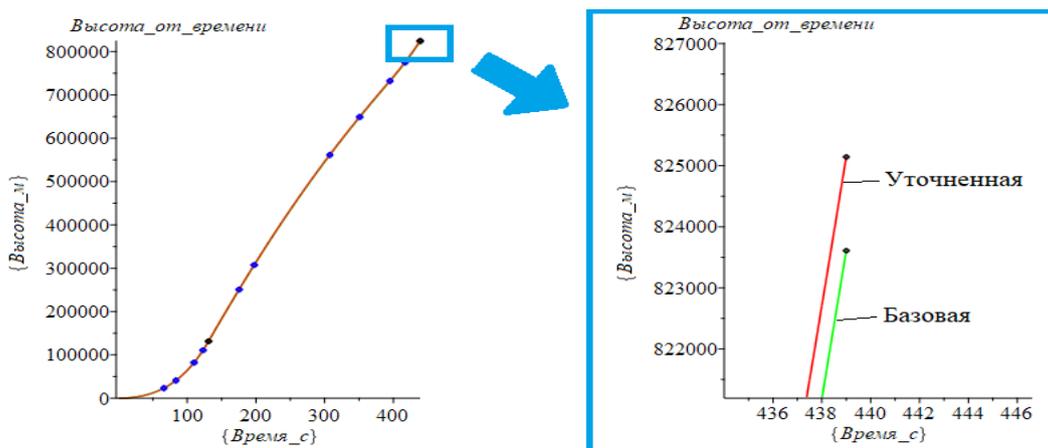


Рис. 2. График высоты от времени ракеты-носителя «Зенит».

Использование разработанной программы расчета с уточненным коэффициентом лобового сопротивления позволит в дальнейшем определять характеристики траектории вывода и параметры ракеты носителя конструктивно-компоновочной схемы «тандем».

### Библиографические ссылки

1. Е. А. Рожкова, В. В. Кольга, В. А. Бордачев Анализ ракет сверхлегкого класса // Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. Том Выпуск 7, 2023. С. 40-46.
2. В. А. Бордачев, В. В. Кольга, Е. А. Рожкова Определение статической устойчивости экспериментальной модельной ракеты // Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023 : Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. Том Выпуск 7, 2023. С. 54-60.
3. Исследование статической устойчивости модельной ракеты / В. А. Бордачев, В. В. Кольга, Е. А. Рожкова // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 64-75.
4. Дегтярь В.Г., Пегов В.И. Аналитическое представление аэродинамических характеристик летательных аппаратов сложной формы // ЮУрГУ: 2015. 50 с.
5. Пат. № 2023663818 Российская Федерация, Расчет траектории вывода космического аппарата на опорную орбиту двухступенчатой ракетой / В. В. Кольга, В. А. Бордачев № 2023662702 : заявл. 21.06.2023 : опубл. 28.06.2023.

### References

1. E. A. Rozhkova, V. V. Kolga, V. A. Bordachev. [Analysis of ultralight class rockets]. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [Collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian Scientific Conference] Krasnoyarsk, February 27-28, 2023. Volume Issue 7, 2023. p. 40-46. (In Russ.).
2. V. A. Bordachev, V. V. Kolga, E. A. Rozhkova [Determination of static stability of experimental model rocket]. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [Collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian Scientific Conference] Krasnoyarsk, February 27-28, 2023. Volume Issue 7, 2023. p. 54-60. (In Russ.).
3. Borodachev V. A., Kolga V. V., Rozhkova E. A. [Investigation of static stability of a model rocket]. Siberian Aerospace Journal. 2023. Vol. 24, No. 1. p. 64-75. (In Russ.).
4. Degtyar V.G., Pegov V.I. Analiticheskoe predstavlenie aerodinamicheskikh kharakteristik letatelnykh apparatov slozhnoi formy [Analytical representation of aerodynamic characteristics of aircraft of complex shape]. SUSU: 2015. p. 50 (In Russ.).
5. V. V. Kolga, V. A. Bordachev Raschet traektorii vyvoda kosmicheskogo apparata na opornuiu orbitu dvukhstupenchatoi raketoj [Calculation of the trajectory of launching a spacecraft into a reference orbit by a two-stage rocket]. Patent RF, no. 2023662702, 2023.

© Бордачев В. А., 2023

УДК 621.923.01

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВОК ДЛЯ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННЫХ ОБРАБОТКИ

А. П. Бритков \*, Л. В. Зверинцева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: britkov12@gmail.com

*В данной статье представлены особенности существующих абразивно-экструзионных установок, предназначенных для обработки деталей машиностроения, в том числе и ракетно-космической техники. Эти особенности необходимо учесть при проектировании отечественной установки.*

*Ключевые слова: конструкция, абразивно-экструзионная обработка, установка, рабочая смесь.*

## DESIGN FEATURES OF INSTALLATIONS FOR ABRASIVE EXTRUSION PROCESSING

A. P. Britkov \*, L. V. Zverintseva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: britkov12@gmail.com

*This article presents the features of existing abrasive extrusion plants designed for processing machine-building parts, including rocket and space technology. These features must be taken into account when designing a domestic installation.*

*Keywords: construction, abrasive extrusion processing, installation, working mixture.*

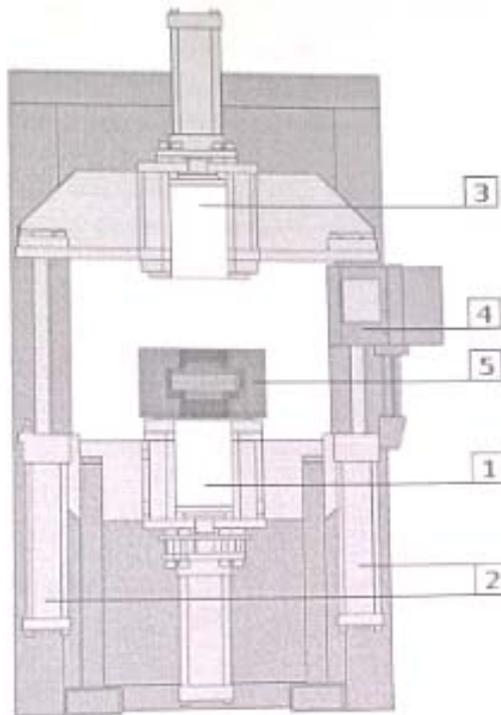
Современные, серийно выпускаемое оборудование для абразивно-экструзионной обработки представляют собой установку с двумя вертикально противоположно направленными блоками гидравлических цилиндров. Перемещаясь возвратно-поступательно, они перемещают рабочую среду относительно заготовки. Для обработки применяется рабочая среда (РС) в составе которой карбид кремния – абразивная полимерная масса со специальными реологическими свойствами, которая обладает текучестью, пластичностью и имеет возможности тонкого шлифования [1]. Толщина удаленного слоя материала составляет примерно от 1 до 10 мкм. Достигнутая отделка поверхности составляет 50 нм и точность  $\pm 0,5$  мкм. Станина установки представляет сварную стальную конструкцию. Обрабатываемая деталь устанавливается на приспособление и зажимается с помощью гидравлики. В процессе обработки усилие замыкания поддерживается на постоянном уровне с помощью пневматического усилителя давления. К установке подводится сжатый воздух с давлением 0,4...0,6 МПа. Рабочая среда при температуре свыше 80° уменьшает вязкость, при температуре 250° – превращается в порошок, не горюча, не взрывоопасна, не растворяется в воде, имеет плотность не более – 1,9 г/см<sup>3</sup> [2].

Управление установкой должно осуществляться с пульта. Система управления процессом позволяет задать и контролировать объем и температуру рабочей среды, количество циклов, давление и противодействие, регулировать скорость перемещения среды. Целесообразно иметь автоматический и ручной режим управления. Максимальная высота открытия – 300...550 мм, высота стандартного приспособления до 50мм. Рабочее давление 1,3...12 МПа. Меньшее давление используется для тонкостенных деталей ракетно-космической техники, которых в этой области множество [3].

В комплектации должны иметься собственно установка, пульт управления, гидростанция, теплообменник, система охлаждения – холодильник и кабина для продувки сжатым воздухом для удаления рабочей смеси с обработанной детали (см. рисунок).

Гидравлическую станцию с давлением 2,4 ... 10,2 МПа, объемом 75 литров и производительностью 19,5 л /мин желательно представлять отдельным блоком, состоящим из масляного резервуара,

мотора, бустерного насоса, фильтра обратной подачи, теплообменника, блока управления электромотором. Система подачи рабочей среды вместимостью 18 кг (приблизительно 10 л). Система зажима обрабатываемой детали создает давление 0,4 ... 0,7 МПа. Насос действует как гидравлический усилитель и гарантирует давление зажима.



Общая схема установки:

- 1 – нижний блок цилиндров; 2 – гидросистема;
- 3 – верхний блок цилиндров; 4 – консоль;
- 5 – приспособление с зажатой деталью

Управление процессом можно осуществлять двумя параметрами: объемом РС и давлением.

Рабочая среда продавливается между верхним и нижним цилиндрами снизу вверх и обратно цикл обработки до прохождения всего объема. При управлении давлением при обратном движении РС – процесс «обратного давления», цикл обработки заключается в том что, рабочая среда поршнем нижнего рабочего цилиндра продавливается через приспособление, с установленной обрабатываемой деталью вверх. Сопротивление движению поршня регулируется на рабочей консоли. Затем нижний поршень без сопротивления отводится назад, в работу включается верхний цилиндр, перемещая РС вниз[4].

Электродвигатель установки мощностью 4 кВт, трехфазного номинального напряжения 0,4 кВ, номинального тока 7,5 А предполагает систему управления программируемым микропроцессорным контроллером, напряжение в системе управления 24В постоянного тока.

Теплообменник изготовлен из стали и алюминия, устанавливается на верхнем и нижнем цилиндре и обеспечивает температурный контроль среды. Охлаждающее устройство воды имеет замкнутую систему и предназначено для работоспособности теплообменника и охлаждения гидравлической системы станка [5].

### Библиографические ссылки

1. Зверинцев В. В. Оценка качества секционно-изогнутых волноводов, решение проблемы уменьшения шероховатости токонесущих поверхностей/ В.В.Зверинцев, Л.В.Зверинцева, Г.В. Кочкина.- Текст : // Технология машиностроения. -. 2017. № 1. С.57-62.

2. Гидроабразив VAPOR BLAST [электронный ресурс] URL: <https://www.gidroabraziv.com/products/standout-abrazivno-ekstruzionnoj-obrabotki-odnonapravlennoy/> (Дата обращения 24.08.2023)

3. Зверинцева Л. В. Абразивное полирование эластичным инструментом. Теоретическое и практические основы процесса. Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2012. 200 с.

4. Зверинцева, Л. В. Исследование рабочей среды при абразивно-эскрузионной обработке / Л. В. Зверинцева, В. В. Зверинцев, Г. В. Кочкина. Текст : // Технология машиностроения -2021. № 5. С. 42-48. ISSN 1562-322X

5. Surface integrity in abrasive flow machining (AFM) of internal channels created by selective laser melting (SLM) in different building directions Sangil Hana\*, Ferdinando Salvatorea, Joël Recha, Julien Bajoletb, Joël Courbonc aUniversité de Lyon, ENISE, LTDS, UMR CNRS 5513, 58 Rue Jean Parot, 42023 Saint-Étienne, France bIPC, Centre Technique d'Innovation en Plasturgie, 2 rue Pierre et Marie Curie, 01100 Bellignat, France

### References

1. Zverincev V. V. Ocenka kachestva sekcionno-izognutyh volnovodov, reshenie problemy umen'sheniya sherohovatosti tokonesushchih poverhnoyey / V.V.Zverincev, L.V.Zverinceva, G.V. Kochkina.- Tekst : // Tekhnologiya mashinostroeniya. - 2017. № 1. S.57-62.

2. Hidroabraziv VAPOR BLAST [elektronnyj resurs] URL: <https://www.gidroabraziv.com/products/standout-abrazivno-ekstruzionnoj-obrabotki-odnonapravlennaya/> (Data access: 24.08.2023)

3. Zverinceva L. V. Abrazivnoe polirovanie elastichnym instrumentom. Teoreticheskoe i pravkticheskie osnovy processa. Izdatel': LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2012. 200 p.

4. Zverinceva, L. V. Issledovanie rabochej sredy pri abrazivno-eskruzionnoj obrabotke / L. V. Zverinceva, V. V. Zverincev, G. V. Kochkina. Tekst : // Tekhnologiya mashinostroeniya -2021. № 5. S. 42-48. ISSN 1562-322H

5. Surface integrity in abrasive flow machining (AFM) of internal channels created by selective laser melting (SLM) in different building directions Sangil Hana\*, Ferdinando Salvatorea, Joël Recha, Julien Bajoletb, Joël Courbonc aUniversité de Lyon, ENISE, LTDS, UMR CNRS 5513, 58 Rue Jean Parot, 42023 Saint-Étienne, France bIPC, Centre Technique d'Innovation en Plasturgie, 2 rue Pierre et Marie Curie, 01100 Bellignat, France

© Бритков А. П., Зверинцева Л. В., 2023

УДК 629.7.02

## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

В. А. Догадкин, А. Е. Михеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: vova.doga.98@mail.ru

*В статье рассматриваются перспективы использования электронно-лучевой сварки на дисперсной прокладке в ракетно-космической технике. В работе предложен процесс электронно-лучевой сварки на дисперсной прокладке.*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, электронно-лучевая сварка, соединение металлов, дисперсная подкладка.*

## ADVANTAGES OF USING ELECTRON BEAM WELDING IN ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

V. A. Dogadkin, A. E. Mikheev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: vitalyaema@gmail.com

*The article discusses the prospects of using electron beam welding on a dispersed gasket in rocket and space technology. The paper proposes the process of electron beam welding on a dispersed gasket*

*Keywords: rocket and space technology, electron beam welding, metal bonding, dispersed lining.*

Электронно-лучевая сварка широко используется в ракетостроении для соединения различных деталей и узлов ракетных двигателей. Этот метод сварки обеспечивает высокую прочность и герметичность сварных швов, что является критическим фактором для обеспечения надежности и безопасности ракет [3, с. 5].

Электронный луч, являясь совокупностью электронов, движущихся по одной траектории, обладает крайне низкой инерционностью и является универсальным тепловым источником. Это открывает широкие возможности по управлению параметрами процесса за счет оперативного изменения основных характеристик луча: тока луча, фокусировки, отклонения и др. и позволяет в широких пределах изменять энергетические и геометрические параметры луча для достижения требуемого воздействия на свариваемое изделие [1, с. 25].

С развитием новых систем управления электронным лучом и программирования режимов ЭЛС существенно расширились возможности по оптимизации старых и разработке новых технологий с использованием различных динамических воздействий на луч.

Системный подход при ЭЛС позволяет изменять параметры колебательного воздействия, в частности, амплитуду, частоту колебаний и возможность расщепления электрического луча на несколько тепловых источников, одновременно контролируя их воздействие на геометрию сварного шва.

При электронно-лучевой сварке используют ряд технологических приемов для улучшения качества шва. Одним из них является сварка на дисперсной подкладке.

Электронно-лучевая сварка с дисперсной прокладкой – это особый вид сварки, при котором используются электронные лучи для плавления и соединения металлов. Этот метод позволяет получить очень прочное и точное соединение деталей [1, с. 67].

Чтобы улучшить выход газов и паров из сварочной ванны и уменьшения интенсивности гидродинамических явлений в ней, а также для снижения трудоемкости удаления подкладки сварку металлов толщиной  $\geq 40$  мм в нижнем положении рекомендуется осуществлять на подкладке из гранул или же рубленой сварочной проволоки. Конструктивно такая подкладка выполняется в виде металлической

коробки с отверстиями, закрытым и металлической сеткой. Коробка наполняется дисперсным материалом. Режим сварки выбирается так, что с варочная ванна достигает наполнителя подкладки. При этом газы и пары из зоны сварки удаляются через промежутки между частицами наполнителя и отверстия в стенках коробки.

Дисперсная прокладка для электронно-лучевой сварки – это слой из металлических или керамических частиц, который наносится между соединяемыми деталями. Этот слой служит для равномерного распределения тепла от электронного луча и обеспечивает более прочное соединение деталей [1, с. 77].

Особенностью этого вида сварки является использование дисперсной прокладки, которая состоит из мелких частиц металла или керамики (рис. 1). Эти частицы равномерно распределяются между соединяемыми деталями и затем подвергаются воздействию электронных лучей. В результате частицы плавятся и образуют тонкий слой между деталями, который обеспечивает их соединение

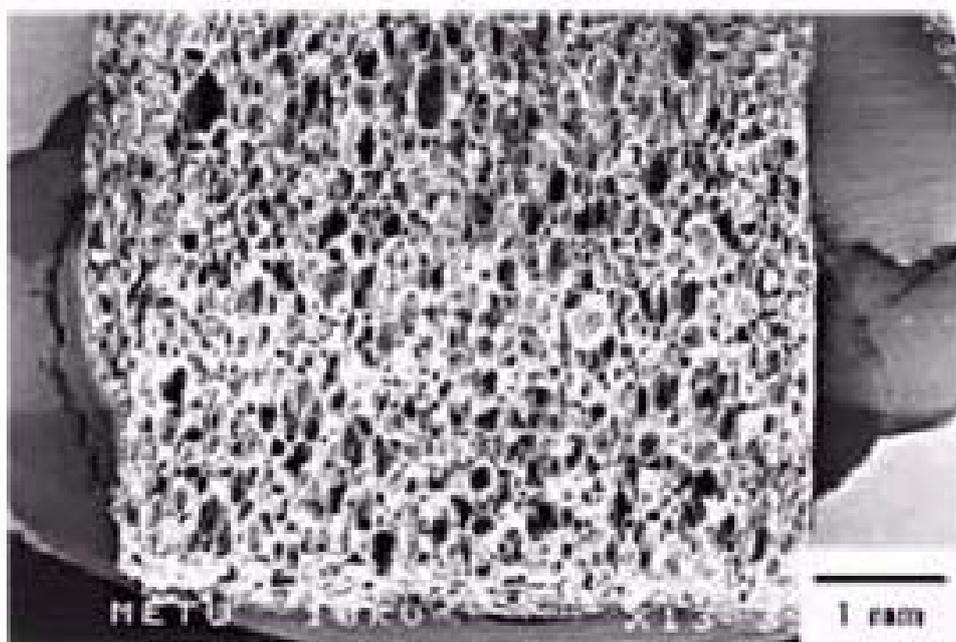


Рис. 1 Дисперсная прокладка

Преимуществами электронно-лучевой сварки на дисперсной прокладке являются высокая прочность и герметичность сварного шва, а также возможность соединения различных металлов и сплавов. Кроме того, этот метод позволяет обрабатывать детали сложной формы и обеспечивать высокую точность соединения.

Однако стоит отметить, что электронно-лучевая сварка требует специального оборудования и высококвалифицированных специалистов, что может быть причиной высокой стоимости этого метода. [2, с.84]

Процесс ЭЛС на дисперсной прокладке состоит из нескольких этапов:

1. Подготовка поверхностей деталей: очистка от загрязнений, обезжиривание и т.д
2. Нанесение дисперсной прокладки: равномерное распределение частиц между деталями.
3. Сварка: включение электронного луча, который плавит частицы и формирует слой между деталями.
4. Охлаждение: после выключения луча детали охлаждаются, и сварной шов затвердевает.
5. Контроль качества: проверка сварного шва на герметичность, прочность и другие параметры.

Основные преимущества ЭЛС на дисперсной прокладке:

1. Высокая прочность сварного шва: достигается за счет равномерного распределения частиц и использования электронного луча
2. Возможность соединения различных материалов: ЭЛС позволяет соединять различные металлы, сплавы и даже керамику.

3. Точность сварки: благодаря использованию электронного луча можно получить очень точные и тонкие сварные швы.

### **Библиографические ссылки**

1. Особенности технологии сварки цветных, тугоплавких металлов и сплавов, а также конструкционных сталей подробно изложены в монографии: Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.

2. Кольга, В. В. Проектирование ракет с ракетным двигателем на твердом топливе: Учебное пособие; Сибирский государственный университет науки и технологии им. ак. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2004. 170 с. Текст : непосредственный.

3. Научно-техническое развитие России и мира: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Саратов: НОП «Цифровая наука». 2023. 294 с.

### **References**

1. B. E. Paton Features of welding technology of non-ferrous, refractory metals and alloys, as well as structural steels are described in detail in the monograph: Electron beam welding / O. K. Nazarenko, A. A. Kaidalov, S. N. Kovbasenko, etc. / Edited by B. E. Paton. Kiev: Naukova dumka, 1987. 256 p.

2. Kolga, V. V. Design of solid propellant rockets: Tutorial; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Krasnoyarsk, 2004. 170 p. Text : direct. (In Russ.)

3. Scientific and technological development of Russia and the world: collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference. Saratov: NOP "Digital Science". 2023. 294 p. (In Russ.)

© Михеев А. Е., Догадкин В. А., 2023

УДК 378

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЛОНЖЕРОННОЙ РАКЕТЫ С АКТИВНОЙ СИСТЕМОЙ СПАСЕНИЯ

Н. А. Жердев\*, Д. А. Ковалев, А. Ю. Тимошева, М. С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: zherdev.nikita98@mail.ru

*Предложена схема экспериментальной модели ракеты лонжеронного типа, которая снимает нагрузку с корпуса ракеты и передаёт металлической шпильке, являющийся лонжероном.*

*Ключевые слова: лонжеронная модельная ракета, активная система спасения, композиционные материалы, осевая устойчивость*

## DESIGNING OF A SPAR ROCKET MODEL WITH AN ACTIVE RESCUE SYSTEM

N. A. Zherdev\*, D. A. Kovalev, A. Yu. Timosheva, M. S. Rudenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: zherdev.nikita98@mail.ru

*A diagram of an experimental model of a spar-type rocket is proposed, which removes the load from the rocket body and transfers it to a metal pin, which is the spar.*

*Keywords: spar model rocket, active rescue system, composite materials, axial stability*

Высокие показатели студентов инженерных специальностей во многом определяется степенью их вовлеченности в реальный производственный процесс или в созданную профессиональную ситуацию, для решения которой необходимо применить предметные знания и навыки.

Студенческое конструкторское бюро «СТАРТ» – это добровольное студенческое объединение, которое образовано на кафедре Летательных аппаратов в 2017 году (ИКТ, СибГУ им М. Ф. Решетнева) и специализируется на проектирование, конструирование и производстве ракетной техники, в частности модели ракет [1]. Основной задачей СКБ «СТАРТ» является решение проблемы профессиональной идентичности студентов путём внедрения практико-ориентированной деятельности в обучении и развития инженерного мышления [2].

В рамках подготовки к Всероссийскому чемпионату по ракетомодельному спорту «Старт с Востока», который проводится на базе Амурского государственного университета в городе Благовещенск в октябре 2023 г., была поставлена задача изменения конструктивно-силовых особенностей привычных моделей ракет. Основная идея заключается в снятии нагрузки с корпуса ракеты и придания ему только аэродинамических свойств. Основная нагрузка пойдёт на шпильку, расположенную вдоль оси модели.

Согласно техническим требованиям чемпионата, модель ракеты с двигателем тягой в 300 Н\*с должна вывести на определенной высоте имитированный полезный груз, после чего необходимо обеспечить её плавный спуск на парашюте. Важным условием являлось проектирование активной системы спасения.

Разработанная модель ракеты представлена на рис. 1. В качестве главного конструкционного материала выбран полимерный композиционный материал (стеклопластик). Изделия из ПКМ имеют высокую прочность, сравнимо малый вес, обеспечивают осевую устойчивость в течение всего полёта, и возможность многократного использования. Корпус 2,9 изготовлен из стекловолокна со связующим компонентом смолы ЭД-20 и отвердителем ПЭПА. Внутренние элементы ракеты фиксируются на шпильку 11. Шпилька крепится в корпус за счёт гайки, закрепленной на верхнем креплении двигателя 3, и имела дополнительные силовые элементы по корпусу 9. Выбор такой конструкции позволил снизить требуемую прочность корпуса, тем самым уменьшив его вес. Была выбрана шпилька усилен-

ная DIN 976 5\*600 мм с классом прочности 6.8, которая обеспечивала стабильность формы в течение всего полёта и малый вес. Крепление на шпильке конструктивного элемента происходило за счёт фиксации снизу и сверху гайкой, что обеспечивало надёжность крепления компонентов внутри ракеты. Было обеспечено достаточную устойчивость ракеты путём перемещения центра тяжести и центра давления, что осуществлялось за счёт изменения положения компонентов модели за счёт их перемещения по вертикальной оси ракеты. Расчёт был произведён в программе Open Rocket. В результате, центр тяжести был расположен на расстоянии 61,4 см от верха ракеты, а центр давления на расстоянии 77,8 см, что дало запас устойчивости в 3,16 cal.

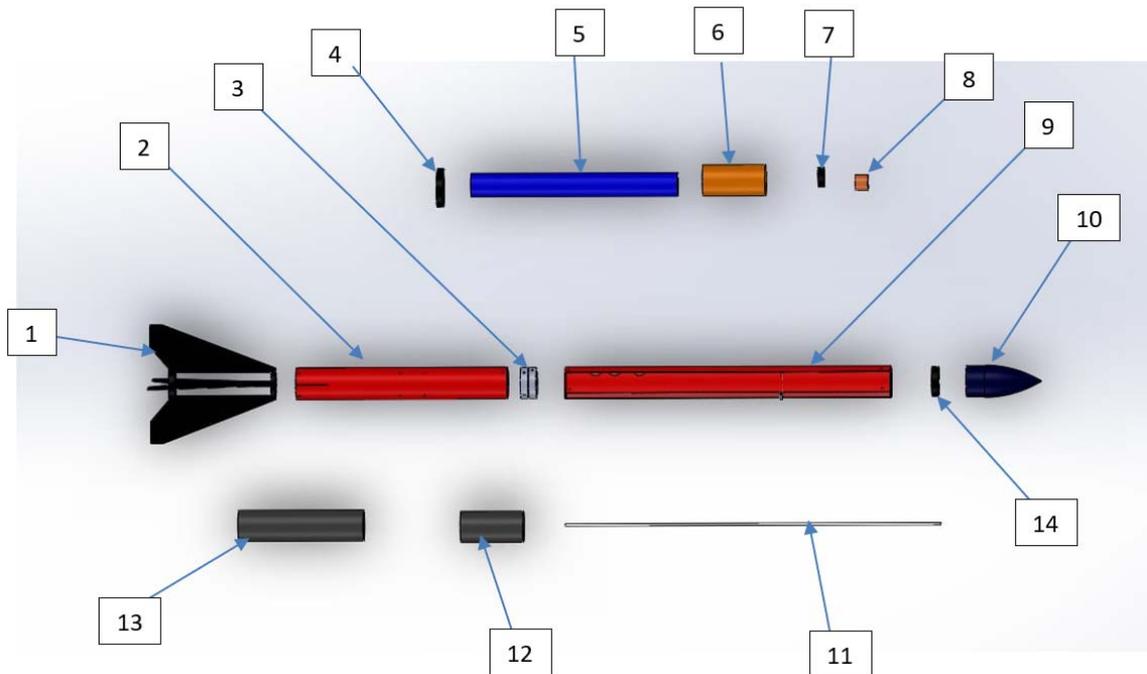


Рис. 1. Трёхмерная модель ракеты:

- 1 – система крепления стабилизаторов; 2 – нижний корпус; 3 – верхнее крепление двигателя;  
 4, 7 – направляющее кольцо; 5 – двигатель; 6 – укладка парашюта; 7 – парашют; 8 – тормозная лента;  
 9 – корпус основной; 10 – обтекатель; 11 – шпилька; 12 – полезный груз;  
 13 – бортовой комплекс; 14 – шпангоут

### Библиографические ссылки

1. Проблемы создания студенческого конструкторского бюро / А. П. Кравчуновский, П. А. Орлин, М. С. Руденко, О. В. Пацук // Экономическая система современного общества: экономика и управление : сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 12 января 09 2018 года. Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Центр развития научного сотрудничества", 2018. С. 59-65. EDN YQXCAK.
2. Морозова О.В. Профессиональная идентичность студентов вуза. // Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения. 2014. № 41. С. 60–64.

### References

1. Problems of creating a student design bureau / A. P. Kravchunovsky, P. A. Orlin, M. S. Rudenko, O. V. Patsuk // Economic system of modern society: economics and management: collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference , Novosibirsk, January 12 09, 2018. Novosibirsk: Limited Liability Company "Center for the Development of Scientific Cooperation", 2018. P. 59-65. EDN YQXCAK.
2. Morozova O.V. Professional identity of university students. // Psychology and pedagogy: methodology and problems of practical application. 2014. No. 41. p. 60-64.

УДК 629.78.023

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ТОРЦОВОЙ ВСТАВКИ ВКЛЕЕННУЮ В СОТОВУЮ ПАНЕЛЬ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Е. А. Иванов<sup>1</sup>, А. Ю. Похабов<sup>1</sup>, А. А. Иконникова<sup>2</sup>, А. Д. Кучеренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Rak-kor-95@mail.ru

*Рассматривается напряженное состояние клеевого слоя торцевой вставки сотовой панели. Более точное определение несущей способности клеевого слоя торцевых вставок позволит создавать универсальные узлы крепления на сотовой панели.*

*Ключевые слова: сотовая панель, торцевая вставка, клеевое соединение, опорный узел, несущая способность опорного узла.*

**ANALYTICAL DETERMINATION OF THE LOAD-LOADING CAPACITY  
OF THE END INSERTS GLUED INTO A HONEYCOMB PANEL  
FOR THE PRODUCTION OF SPACE VEHICLES**

Е. А. Ivanov<sup>1</sup>, А. Yu. Pohabov<sup>1</sup>, А. А. Ikonnikova<sup>2</sup>, А. D. Kucherenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite System»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Rak-kor-95@mail.ru

*The stress state of the adhesive layer of the end insert of a honeycomb panel is considered. A more accurate determination of the load-bearing capacity of the adhesive layer of the end inserts will make it possible to create universal fastening units on the honeycomb panel.*

*Keywords: honeycomb panel, end insert, adhesive connection, support unit, load-bearing capacity of the support unit.*

Весовые характеристики, для космических аппаратов (КА), играют важную роль на всех этапах проектирования, конструирования и эксплуатации. Именно по этой причине в авио- и космомашиностроении, уже более полувека, используются несущие конструкции, сформированные из сотовых панелей. При этом, для формирования конструкций, в сотовых панелях необходимо сформировать места для крепления и монтажа оборудования. С этой целью, для особо нагруженных мест используются торцевые вставки [1; 2].

Торцевая вставка представляет собой монолитную или сборочную пустотелую деталь, которую устанавливают в торцевой части сотовой панели при помощи клеевой пленки. Торцевая вставка является опорным узлом, местом крепления конструктивных элементов (рис. 1). Она применяется в тех случаях, когда использование закладных элементов, выполненных в виде втулки с двумя фланцами, описанных в [3; 4], и установленных в отверстиях сотовой панели нецелесообразно.

Одним из основных преимуществ торцевых вставок перед обычными закладными элементами, это более эффективное использование массы детали. Поскольку вставка фиксируется в торце сотовой панели при помощи пленочного клея, а не вспенивающего, как у обычных закладных элементов, что существенно уменьшает удельную массу опорного узла относительно несущей способности торцевой вставки.

Соответственно, нахождение метода расчета несущей способности торцевой вставки, для различных видов нагружения, является одним из главных условий для использования торцевой вставки в конструкции КА.

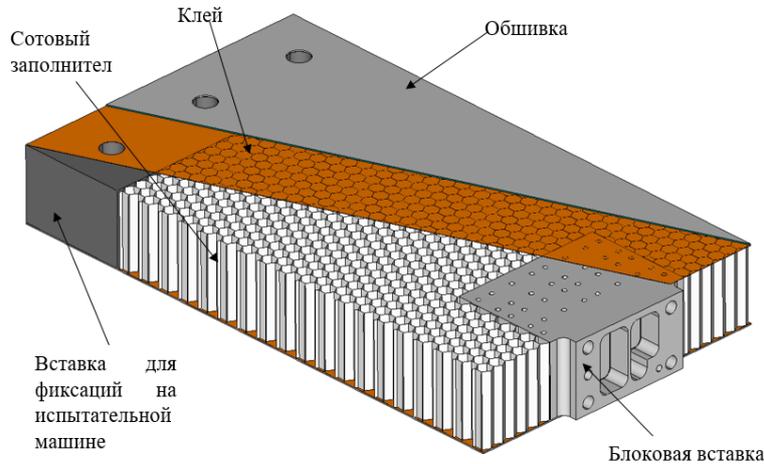


Рис. 1. Сотовая панель с торцевой вставкой

На основании результатов испытаний (табл. 1) несущей способности торцевых вставок сотовой панели при сложном напряженном состоянии, было определена формула несущей способности с учетом деформации сечения и неравномерным распределением напряжения в клеевом слое, которая сошлась с данными испытаний (см. табл. 1).

$$F = \frac{2 \cdot \tau_{\max} \cdot W_k \cdot h \cdot b}{(L \cdot b \cdot h + W_k) \cdot n \cdot k},$$

где  $\tau_{\max}$  – предел прочности клеевой пленки при сдвиге;  $W_k$  – момент сопротивления кручению профиля клеевого контакта [5];  $h, b$  – высота и ширина клеевого контакта;  $k$  – коэффициент учитывающий деформацию сечения, принимающий значения от 1,0 до 1,15;  $n$  – коэффициент характеризующий неравномерное распределение напряжения в клеевом слое и его неравномерную концентрацию.

Данный коэффициент  $n$  можно определить по следующей формуле [6, с. 210]

$$n = \sqrt{\frac{\Delta}{W}} \cdot \frac{(W - 1) + \cosh \sqrt{\Delta \cdot W}}{\sinh \sqrt{\Delta \cdot W}},$$

в котором

$$\Delta = \frac{G \cdot l_n^2}{E_2 \cdot \delta_1 \cdot d},$$

$$W = \frac{E_1 \cdot \delta_1 + E_2 \cdot \delta_2}{E_1 \cdot \delta_2},$$

здесь  $G$  – модуль сдвига клеевой прослойки;  $E_1, E_2$  – модуль упругости при растяжении соединяемых материалов;  $\delta_1, \delta_2$  – толщины соединяемых деталей;  $d$  – толщина клеевой прослойки;  $l_n$  – длина нахлестки.

Таблица 1

**Сравнение результатов эксперимента с расчетами**

Номер образца	Несущая способность торцевых вставок, Н	Расчетное значение, Н
1	26000	21075
2	21500	
3	25000	
4	26000	
5	25000	

Таким образом, исходя из результатов сравнения опытных данных с расчетными, можно прийти к выводу что данный аналитический способ применим для настоящих расчетов вклеенных торцевых вставок.

#### Библиографические ссылки

1. Пат. 200699 Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> В32В 3/00. Торцевой опорный узел сотовой панели / Сныткова М.А., Похабов А.Ю., Иванов Е.А., Наговицин В.Н. № 2020115731: заявл. 13.05.2020 : опубл. 05.11.2020. Бюл. № 31.
2. Пат. 204976 Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> В32В 3/00. Торцевой опорный узел сотовой панели / Сныткова М.А., Похабов А.Ю., Иванов Е.А., Наговицин В.Н. № 2021104951: заявл. 26.02.2021 : опубл. 21.06.2021. Бюл. № 18.
3. Иванов Е.А., Иконникова А.А., Клешина И.А., Наговицин В.Н., Похабов А.Ю. Применение конструкций сотовых панелей в космических аппаратах. Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. #5(125).
4. Пат. 201937 Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> В32В 3/06, В32В 3/12. Опорный узел сотовой панели / Иванов Е.А., Похабов А.Ю., Сныткова М.А., Наговицин В.Н., Сныткова М.А. № 2020128905: заявл. 01.09.2020 : опубл. 21.01.2021. Бюл. № 3.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. 3-е изд., перераб. и доп.- К.: «Издательство Дельта», 2008.-816 с.
6. Комаров Г.В. Способы соединения деталей из пластических масс. М.: Химия, 1979. 288 с., ил.

#### References

1. Ivanov E.A., Ikonnikova A.A., Kleshnina I.A., Nagovicin V.N., Pohabov A.Yu. *Torcevoi opornii uzel sotovoi paneli* [Honeycomb panel end support assembly]. Patent RF. no. 200699. 2020.
2. Ivanov E.A., Ikonnikova A.A., Kleshnina I.A., Nagovicin V.N., Pohabov A.Yu. *Torcevoi opornii uzel sotovoi paneli* [Honeycomb panel end support assembly]. Patent RF. no. 204976. 2021.
3. Ivanov E.A., Ikonnikova A.A., Kleshnina I.A., Nagovicin V.N., Pohabov A.Yu. *Primenenie konstrukcii sotovih panelei v kosmicheskikh apparatah*. [Application of honeycomb panel designs in spacecraft.] Engineering Journal: Science and Innovation Publ., 2022. #5(125).
4. Ivanov E.A., Pohabov A.Yu., Snitkova M.A., Nagovicin V.N., Snitkova M.A. *Opornii uzel sotovoi paneli* [Honeycomb panel support assembly]. Patent RF. no. 201937. 2021.
5. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook of Strength of Materials. 3rd ed., revised. and additional K.: "Delta Publishing House", 2008.-816 p.
6. Komarov G.V. Methods for joining plastic parts. –M.: Chemistry, 1979. 288 p.

© Иванов Е. А., Похабов А. Ю., Иконникова А. А., Кучеренко А. Д., 2023

УДК 531

## МАНЕВРИРОВАНИЕ КАПСУЛЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ФОБОСА С ПОМОЩЬЮ ТРОСА

А. А. Игнатова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
E-mail: IgnAtovA1aa@yandex.ru

*Объектом исследования является плоское движение капсулы в околофобосном пространстве. Анализ Фобоса представляет большой интерес с точки зрения получения ответов о формировании планет, создания и апробации новейших технических решений.*

*Ключевые слова: Марс, Фобос, точки либрации, тросовая система, квазиспутниковые орбиты, уравнения движения.*

## MANEUVRING A CAPSULE FIXED TO THE SURFACE OF PHOBOS WITH A TETHER

A. A. Ignatova

Samara National Research University  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: IgnAtovA1aa@yandex.ru

*The object of the study is the plane motion of the capsule in near-phobos space. The analysis of Phobos is of great interest from the point of view of obtaining answers about the formation of planets, creation and testing of the latest technical solutions.*

*Keywords: Mars, Phobos, libration points, tether system, quasi-satellite orbits, equations of motion.*

Марс – это планета, имеющая атмосферу наиболее похожую на земную. На его поверхности сохранились древние рельефы, много численные кратеры и следы ударов. Благодаря этому Марс является единственной планетой, для которой мы можем достаточно точно проследить историю развития до ранней эволюции гидросферы. Тем не менее, сложно изучать процессы формирования планеты только через изучение ее поверхностного слоя, поскольку на Марсе существуют процессы наплавки поверхности, частично скрывающие информацию. С другой стороны, безвоздушные спутники Марса Фобос и Деймос слишком малы для активизации магматических процессов и, скорее всего, сохранили в себе исходный материал без серьезных изменений. А это может обеспечить возможность изучения ключевых процессов формирования Марса [1]. Исследование Фобоса представляет большой интерес для планетологии и побуждает к анализу его образцов для различных целей. Дополнительный интерес представляет развитие технологий, необходимых для путешествий между Землей и Марсом, создание передовых методов отбора проб на небесных телах, разработка оптимальных технологий космической связи, апробация новейших технических решений для исследования космоса.

При исследовании Фобоса предлагается использовать тросовые системы и коллинеарные точки либрации L1 и L2 [2]. Это особые точки в системе из двух массивных тел, в которых третье тело с очень малой массой может оставаться неподвижным относительно этих тел. Тросовая система крепится на поверхности Фобоса под точками L1 и L2 [3; 4]. Такую систему можно использовать в качестве космического лифта, а также для доставки аппаратов путем вывода на орбиту Фобоса, а затем и на другие [5].

На рис. 1 представлена принципиальная схема миссии по разворачиванию троса с капсулой. Её можно разделить на три основных этапа: орбитальный космический аппарат (ОКА) находится в точке

либрации  $L_1$  системы Марс-Фобос. Из него выпускается трос, который с помощью специального приспособления закрепляет ОКА на поверхности Фобоса в кратере Стикни. После этого, используя трос в качестве космического лифта, на поверхность спускаются роверы и аппаратура для сбора образцов грунта, проведения экспериментов или получения иной информации. Следующим этапом будет выведение капсулы с образцами на промежуточные QSO Фобоса для дальнейшей транспортировки на Землю. При разворачивании тросовой системы она начинает отклоняться от вертикальной оси, при достижении нужного значения угла отклонения трос обрывается, и капсула продолжает движение по некоторой траектории.

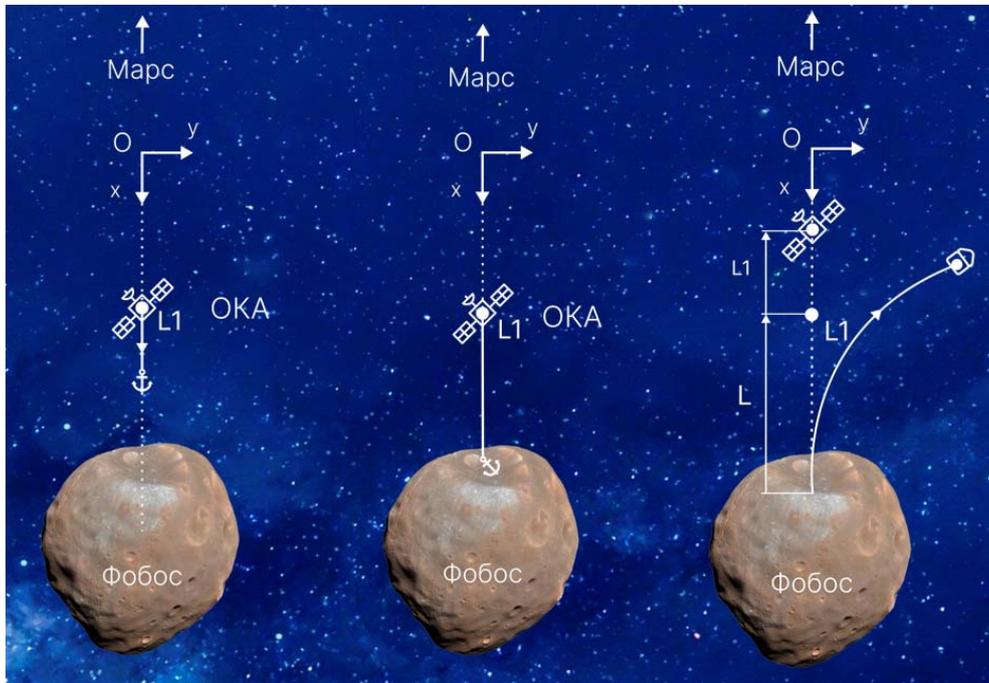


Рис. 1. Разворачивание тросовой системы

В основе математической модели лежат классические уравнения ограниченной задачи трех тел. Рассматривалось плоское движение капсулы.

В результате моделирования была найдена квазиспутниковая орбита, удовлетворяющая условиям замкнутости и положения выше точки  $L_1$ . Проведено исследование динамики отклонения троса от вертикальной оси в зависимости от времени при изменении длины троса. Для сравнения рассматривались два закона управления: первый с нулевой скоростью в начальный и конечный моменты времени, а второй с постоянной скоростью. Найдены зависимости силы натяжения троса от времени и длины троса при двух законах управления, построены траектории движения капсулы с образцами Фобоса при различных параметрах: длина разворачивания тросовой системы, ее скорость, угол отрыва и начальное отклонение троса.

Полученные результаты могут быть использованы при планировании миссий по доставке образцов Фобоса на Землю, при разворачивании тросовых систем с поверхности Фобоса, а также при использовании квазиспутниковых орбит Фобоса в качестве промежуточных этапов во время вывода космических аппаратов с поверхности спутника.

#### Библиографические ссылки

1. Kiyoshi Kuramoto, Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets [Text]/ Kiyoshi Kuramoto, Yasuhiro Kawakatsu, Masaki Fujimoto//Earth, Planets and Space 2022. P. 3.
2. J. Pearson, Phase I Study Report For The Phobos  $L_1$  Operational Tether Experiment (PHLOTE) [Text]/ J. Pearson, E. Levin, J. Carroll// NASA Advanced Innovative Concepts Program 2018.– P. 9–13].
3. V.S. Aslanov, Dynamics of a Phobos-anchored tether near the  $L_1$  libration point [Text]// Nonlinear Dyn 2022. P. 1–3.

4. V.S. Aslanov, Prospects of a tether system deployed at the L1 libration point [Text]// Nonlinear Dyn–2021. P. 1–3.
5. Gefei Shi, Libration suppression of tethered space system with a moving climber in circular orbit [Text]/ Gefei Shi, Zhanxia Zhu, Zheng H. Zhu//Nonlinear Dyn 2017. P. 3–5.

### **References**

1. Kiyoshi Kuramoto, Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets [Text]/ Kiyoshi Kuramoto, Yasuhiro Kawakatsu, Masaki Fujimoto//Earth, Planets and Space 2022. P. 3.
2. J. Pearson, Phase I Study Report For The Phobos L1 Operational Tether Experiment (PHLOTE) [Text]/ J. Pearson, E. Levin, J. Carroll// NASA Advanced Innovative Concepts Program 2018.– P. 9–13].
3. V.S. Aslanov, Dynamics of a Phobos-anchored tether near the L1 libration point [Text]// Nonlinear Dyn 2022. P. 1–3.
4. V.S. Aslanov, Prospects of a tether system deployed at the L1 libration point [Text]// Nonlinear Dyn–2021. P. 1–3.
5. Gefei Shi, Libration suppression of tethered space system with a moving climber in circular orbit [Text]/ Gefei Shi, Zhanxia Zhu, Zheng H. Zhu//Nonlinear Dyn 2017. P. 3–5.

© Игнатова А. А., 2023

УДК 629.76

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ СПАСЕНИЯ ЛОНЖЕРОННОЙ МОДЕЛИ РАКЕТЫ

Д. А. Ковалев\*, Н. А. Жердев, А. Ю. Тимошева, М. С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: deniskov.0@mail.ru

*В данной статье представлены результаты разработки активной системы спасения для модели ракеты с сервоприводом.*

*Ключевые слова: система спасения, модель ракеты, лонжерон, сервопривод.*

## DESIGNING AN ACTIVE RESCUE SYSTEM FOR A ROCKET SPAR MODEL

D. A. Kovalev\*, N. A. Zherdev, A. Yu. Timosheva, M. S. Rudenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: deniskov.0@mail.ru

*This paper shows the results of the development of an active rescue system for a servo-powered rocket model.*

*Keywords: rescue system, rocket model, spar, servo.*

Проектирование и разработка системы спасения ракеты является одной из основных задач современного ракетомоделирования. По регламентам чемпионатов и хакатонов участники должны осуществить запуск возвращаемой модели ракеты, что подразумевает плавный спуск модели на парашюте [1-3]. Основой пассивных систем спасения ракет являются вышибные заряды двигателей [4]. Все чаще предпочтения отдаются активным системам, поскольку их механизм можно разработать самостоятельно под конкретные задачи.

Данный вариант системы спасения использовался в модели ракеты с двигателем 300 Н/с, при конструировании которой было принято решение от несущего корпуса перейти к лонжеронной модели, что позволило использовать корпус как элемент системы спасения.

Поэтапное представление работы системы представлено на рис. 1–2. Основная идея заключается в разделении корпуса ракеты на две равных части: подвижную и неподвижную. Подвижная часть плотно фиксируется с неподвижной при помощи сервопривода (рис. 1, а). При поступлении команды на сервопривод рычаг поворачивается на 90 градусов (рис. 1, б), происходит разблокировка части корпуса, который, с помощью силы упругости резинки высвобождает полезную нагрузку и парашют (рис. 2).

Данная система обладает рядом достоинств:

1. Масштабируемость. Может быть использована в моделях ракет различных размеров, с полезными грузами различных масс, так как выбрасывание полезного груза происходит через парашют за счет аэродинамического сопротивления воздуха, а не механических средств.
2. Надежность. Зависит только от сервопривода, который является достаточно надежным механизмом.
3. Простота обслуживания. Обеспечивает быстрый и беспрепятственный доступ ко всем элементам конструкции, а также легкость повторного использования.
4. Возможность регулировать положение центра тяжести модели ракеты, путем изменения взаимного положения элементов конструкции по высоте.

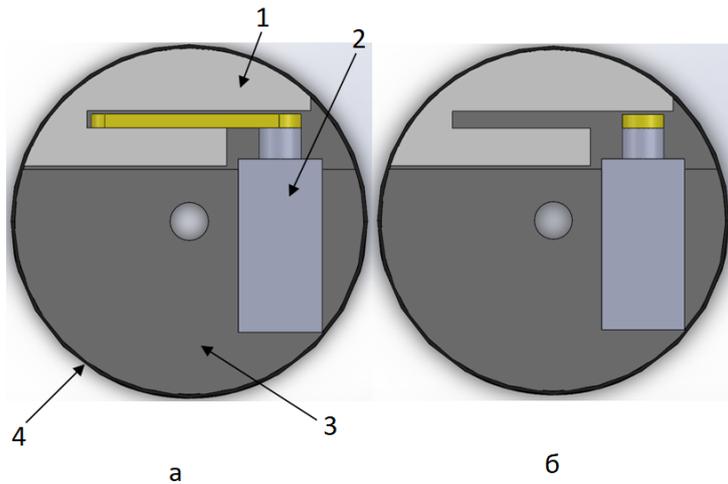


Рис. 1. Модель системы:  
а – в закрытом положении (1 – элемент фиксации корпуса подвижного;  
2 – сервопривод; 3 – бортовой комплекс; 4 – корпус);  
б – после срабатывания сервопривода,

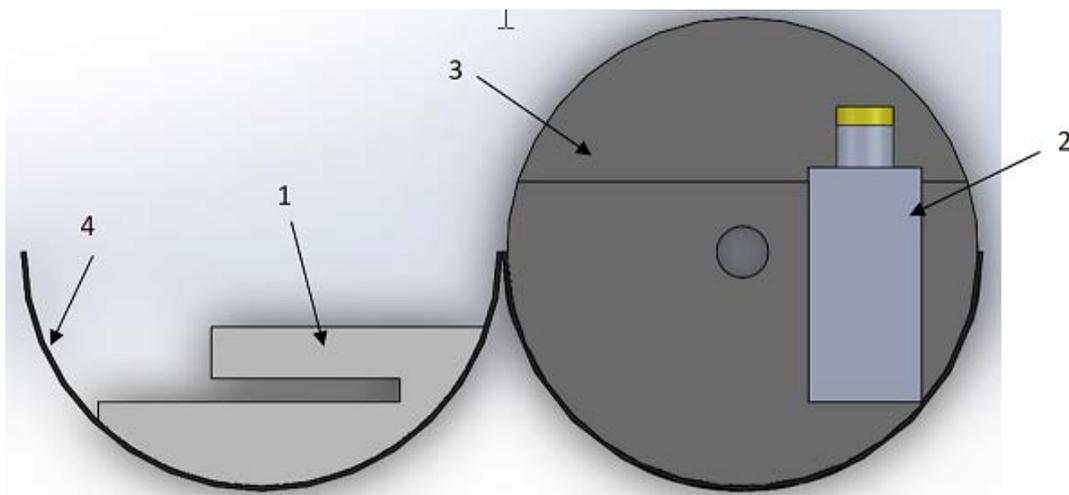


Рис. 2. Модель системы в открытом положении:  
1 – элемент фиксации корпуса подвижного; 2 – сервопривод;  
3 – бортовой комплекс; 4 – корпус

Разработанная система спасения была применена в модели ракеты, запущенной с аэродрома Бобровка. Система штатно отработала на всех предполетных проверках, а также непосредственно при запуске. В перспективе стоит рассмотреть дополнительные условия срабатывания системы спасения и дополнить программный код [5].

#### Библиографические ссылки

1. П. Эльштейн. Конструктору моделей ракет. М. : Мир, 1978. 168-180 с.
2. В. Рожков. Спортивные модели ракет. М. : ДОСААФ, 1984. 38-50 с.
3. В. А. Горский, Ракетное моделирование. М. : ДОСААФ, 1973. 129-140 с.
4. Испытательный стенд для тестирования системы спасения модели ракеты П.А. Орлин, Д.И. Быстров, Е.С. Тихоненко / Актуальные проблемы авиации и космонавтики 2017. Том 1 стр. 80-81
5. Калашников, А. С. Проектирование полезной нагрузки для расчета параметров полета модельных ракет / А. С. Калашников, А. Д. Кучеренко, М. С. Руденко // Актуальные проблемы авиации и

космонавтики : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Красноярск, 12–16 апреля 2021 г. С. 32-34.

### References

1. P. Elstein. To the designer of rocket models. Moscow : Mir, 1978. 168-180 p.
2. V. Rozhkov. Sports models of rockets. Moscow : DOSAAF, 1984. 38-50 p.
3. V. A. Gorsky, Rocket modeling. M. : DOSAAF, 1973. 129-140 p
4. Test bench for testing the rescue system of the rocket model P.A. Orlin, D.I. Bystrov, E.S. Tikhonenko / Actual problems of aviation and cosmonautics 2017. Volume 1 p. 80 81
5. Kalashnikov, A. S. Designing a payload for calculating the flight parameters of model rockets / A. S. Kalashnikov, A. D. Kucherenko, M. S. Rudenko // Actual problems of aviation and cosmonautics: Collection of materials of the VII International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 12-16, 2021 p. 32-34.

© Ковалев Д. А., Жердев Н. А., Тимошева А. Ю., Руденко М. С., 2023

УДК 629.7.017

## ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

О. В. Крашенинникова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: olesya.krash@mil.ru

*В работе рассматриваются актуальные материалы, которые испытываются различными методами для последующей установки на космический летательный аппарат. Перечислены этапы испытаний данных материалов.*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, испытания материалов для ракет, материалы для космических аппаратов, летательные аппараты.*

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SMALL SPACECRAFT

O. V. Krasheninnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: olesya.krash@mil.ru

*The paper discusses current materials that are tested by various methods for subsequent installation on a spacecraft. The stages of testing of these materials are listed.*

*Keywords: rocket and space technology, testing of materials for rockets, materials for spacecraft, aircraft.*

На данный момент в различных лабораториях по всему миру проводятся испытания новых материалов, которые могут выдерживать экстремальные условия во время запуска и полета ракетно-космической техники [1]. Это необходимо для улучшения производительности и эффективности ракет. К таким материалам относятся: термоизоляционные материалы, которые используются для защиты ракет от термических перегрузок во время полета; материалы с высокой теплопроводностью, которые необходимы для эффективного отвода тепла от ракетных двигателей; материалы, обладающие высокой устойчивостью к излучению, которые используются для защиты электронной аппаратуры и других чувствительных компонентов ракеты.

Выбор и разработка новых материалов для ракетно-космической техники является сложным процессом, который состоит из анализа требований к материалу и обзора существующих материалов. Специалисты производят предварительный отбор материалов, которые могут соответствовать требованиям, далее проводятся исследования и эксперименты с новыми веществами. После проведения всех необходимых опытов полученные данные оцениваются с использованием различных компьютерных программ. Это позволяет определить применимость материала для конкретной ракетно-космической техники. Весь процесс может занимать многие годы, и часто требует сотрудничества между учеными, инженерами и представителями различных организаций, чтобы достичь успешной разработки и внедрения новых материалов.

Новые материалы для ракетно-космической техники перед внедрением в производство проходят широкий спектр лабораторных испытаний, чтобы проверить их надежность. Испытания материалов проводятся в несколько этапов, их основной целью является проверка качества материалов и их пригодности для использования в экстремальных условиях космоса:

1. Химический анализ. Первоначально материалы проходят химический анализ для определения их качества. Это необходимо для установления соответствия материалов требованиям и стандартам

для ракетно-космической техники. Затем проводятся испытания на коррозионную стойкость, так как вакуум в космосе значительно увеличивает скорость окисления материалов. Материал проверяют на способность сопротивляться разрушению вследствие химической реакции с окружающей средой, для этого используются тестирования в растворах соляной кислоты.

2. Механическая прочность. Материалы подвергаются испытаниям на механическую прочность, при этом измеряется величина приложенной силы и деформация, чтобы проверить их способность выдерживать различные нагрузки, включая сильные вибрации и удары, которые могут возникнуть во время запуска ракеты и полета в космосе. К таким испытаниям можно отнести испытание на изгиб, когда материал размещается на двух опорах и подвергается изгибающему моменту или же испытания на ударную прочность, когда материал подвергается удару определенной силы, и измеряются величина ударной энергии и разрушенная область.

3. Испытания на износостойчивость. В процессе выведения на стартовую позицию, в условиях космического полета и при посадке на другие планеты космические аппараты подвергаются воздействию внешних механических нагрузок. Поэтому материалы обязательно испытывают на износ и старение, чтобы определить их долговечность и способность сохранять свои свойства в течение длительного времени. Материал подвергается постоянному трению и измеряется количество изношенного материала. Один из наиболее распространенных способов испытания на износ – метод Абразивного истирания, при котором материал подвергается воздействию абразивного материала, такого как песок или алмазная пыль.

4. Испытания на тепловые характеристики. При запуске и полете ракеты материалы будут подвергаться значительным тепловым нагрузкам, поэтому проводятся тесты на высокие и низкие температуры, чтобы проверить способность материалов сохранять структурную целостность и свойства при экстремальных термических воздействиях. Процедуры испытаний на тепловые характеристики могут заметно различаться в зависимости от конкретных требований и стандартов. Одним из распространенных методов является измерение коэффициента теплопроводности материала. В этом случае образец подвергается разным температурам и измеряется разница температур на разных его точках для оценки способности материала проводить тепло. А испытания на коэффициент теплового расширения обычно проводятся путем измерения изменений длины или объема материала при разной температуре. Для проведения испытаний на тепловые характеристики могут использоваться специализированные приборы и оборудование, такие как термоанализаторы, пирометры и тепловизоры.

5. Испытания на радиационную стойкость. Материалы испытывают на радиацию, которая может присутствовать в космосе [2]. Материал подвергается интенсивному потоку высокоэнергетических частиц. Такие испытания могут проводиться с различными типами радиации, такими как гамма-лучи, нейтроны, электроны и протоны. Целью этих испытаний является определение, какие изменения происходят в структуре и свойствах материала под воздействием радиации. Материал с хорошей радиационной стойкостью будет иметь минимальное изменение своих свойств и не будет подвержен деградации.

6. Тестирование в вакууме. Вакуум в космосе может вызвать возникновение токов утечки, разрядов, пробоев, а также других нежелательных электрофизических явлений при эксплуатации электронного и электротехнического оборудования ракетно-космической техники, поэтому материалы подвергаются испытанию в условиях вакуума, чтобы определить их поведение при отсутствии внешнего влияния атмосферы. Образец материала помещается в вакуумную камеру, где атмосферное давление снижается до низкого или нулевого значения. Вакуум используется для изучения поверхности материала. Поверхностные свойства, такие как шероховатость, химическая активность или электростатические свойства, могут быть исследованы в вакууме с помощью различных методов, включая атомно-силовую микроскопию, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию [3] или электронную спектроскопию с энергодисперсионным анализом [4].

Все данные, полученные в результате испытаний, анализируются специалистами, и основываясь на этой информации, принимается решение о пригодности материалов для применения в ракетно-космической технике. После принятия решения о пригодности материала, разрабатываются необходимые документы, такие как стандарты и спецификации, которые указывают требования к материалу для его применения в конкретных системах ракетно-космической техники.

Испытания материалов для ракетно-космической техники позволяют обеспечить надежность, безопасность и эффективность космических аппаратов, так как именно испытания позволяют оценить срок службы и долговечность ракетно-космической техники, что очень важно для проведения успеш-

ных космических миссий. Данные, полученные при испытаниях, являются ценным источником информации для выбора материалов в будущих космических проектах, так как они проводятся с учетом требований и нормативных документов, применимых в космической отрасли.

### **Библиографические ссылки**

1. Перечень изделий РКТ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/34744/> (дата обращения: 08.08.2023).
2. Космическая радиация в околоземном пространстве [Электронный ресурс]. URL: [https://www.keldysh.ru/amadeos2021/AMADEOS\\_Svertilov\\_Radiation.pdf](https://www.keldysh.ru/amadeos2021/AMADEOS_Svertilov_Radiation.pdf) (дата обращения: 08.08.2023).
3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/412084/page:3/> (дата обращения: 09.08.2023).
4. Оже-спектроскопия [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/16563807/page:14/> (дата обращения: 09.08.2023).

### **References**

1. Perechen' izdelij RKT. Available at: <https://www.roscosmos.ru/34744/> (accessed 08.08.2023).
2. Kosmicheskaya radiaciya v okolozemnom prostranstve. Available at: [https://www.keldysh.ru/amadeos2021/AMADEOS\\_Svertilov\\_Radiation.pdf](https://www.keldysh.ru/amadeos2021/AMADEOS_Svertilov_Radiation.pdf) (accessed 08.08.2023).
3. Rentgenovskaya fotoelektronnaya spektroskopiya. Available at: <https://studfile.net/preview/412084/page:3/> (accessed 09.08.2023).
4. Ozhe-spektroskopiya. Available at: <https://studfile.net/preview/16563807/page:14/> (accessed 09.08.2023).

© Крашенинникова О. В., 2023

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАКРЕПЛЕНИЙ ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗНАЧЕНИЯ ПЕРВОЙ ИЗГИБНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ И КРИТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

И. В. Кудрявцев

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: ikudryavtsev@sfu-kras.ru

*Разработана методика выбора схемы закрепления многоопорных конструкций волноводных трактов, которая позволяет обеспечивать значения первой собственной частоты колебаний и критической нагрузки с учетом температуры и жесткости опор.*

*Ключевые слова: волновод, многоопорная конструкция, первая частота колебаний, первая критическая сила, коэффициент опор, температура, жесткость опоры.*

## JUSTIFICATION OF WAVEGUIDE SUPPORTS PROVIDING VALUE OF FIRST EIGENFREQUENCY OF BENDING VIBRATION AND CRITICAL LOAD

I. V. Kudryavtsev

Siberian federal university  
79, Svobodny prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*E-mail: ikudryavtsev@sfu-kras.ru

*A procedure for selecting a scheme for fixing multi-support structures of waveguides has been developed, which makes it possible to ensure the values of the first eigenfrequency of bending vibrations and critical load taking into account the temperature and stiffness of the supports.*

*Keywords: waveguide, multi-span structure, first eigenfrequency, first critical force, support factor, temperature, support stiffness.*

Разработана методика проектного и проверочного расчета многоопорных конструкций волноводов, позволяющая обосновывать закрепления (рис. 1), обеспечивающие значения первой собственной частоты колебаний и критической нагрузки (силовой и температурной).

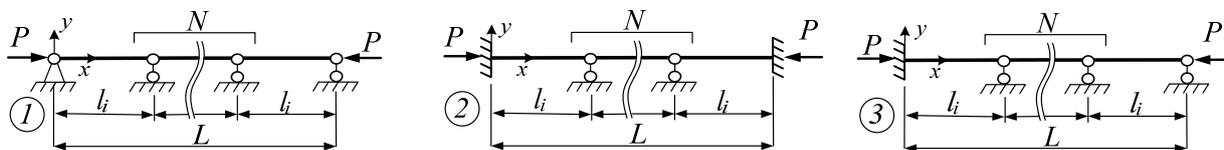


Рис. 1. Варианты схем закреплений многоопорной конструкции волновода

Расчет колебаний и устойчивости многоопорных конструкций связан с коэффициентами опор  $\alpha$  и  $\mu$  для каждого условия закрепления [1]. В работе [2; 3] предлагается нормирование значений этих коэффициентов опор (табл. 1) и критерий выбора схемы закрепления (1) на основе заданной величины первой собственной частоты колебаний  $[f_1]$

$$\alpha_{\min} = C_p + \sqrt{C_p^2 + \frac{4m[f_1]^2 L^4}{\pi^2 EJ}}, \quad (1)$$

где  $C_p = \frac{L^2}{2\pi^2 EJ} \cdot (\alpha_t \cdot \Delta T \cdot ES + P_F)$ .

Таблица 1

**Нормированные значения коэффициентов опор**

№ схемы	Коэф- фициент	Число промежуточных опор $N$										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$\alpha'$	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100	121
	$\mu'$	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100	121
2	$\alpha'$	2,267	6,250	11,54	18,66	27,75	38,77	51,80	66,82	83,83	102,8	124,0
	$\mu'$	4	8,187	13,58	20,71	29,73	40,83	53,84	68,87	85,91	104,8	126,5
3	$\alpha'$	1,563	4,666	9,697	16,71	25,72	36,72	49,70	64,71	81,75	100,7	121,7
	$\mu'$	2,041	5,177	10,21	17,22	26,19	37,26	50,20	65,30	82,31	101,2	122,0

Рассчитав (1), выбираем из таблицы 1 схему закрепления и число промежуточных опор  $N$ , для которых выполняется условие  $\alpha, \mu \geq \alpha_{min}$ . Длина каждого пролета равна  $l = L/(N + 1)$  (рис.1). Выбранная схема обеспечивает значения первой собственной частоты колебаний и первой критической нагрузки, фактические значения которых будут равны:

$$f_1 = \frac{\alpha'}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{4m} \left[ \pi^2 EJ - \frac{L^2}{\mu'} (\alpha_i \cdot \Delta T \cdot ES + P_F) \right]} \geq [f_1], \quad (2)$$

$$P_{cr-1} = \mu' \left[ \frac{\pi^2 EJ}{L^2} - \frac{4mL^2 [f_1]^2}{\alpha'^2} \right], \quad \Delta T_{cr-1} = \frac{1}{\alpha_i ES} \left[ \mu' \left( \frac{\pi^2 EJ}{L^2} - \frac{4mL^2 [f_1]^2}{\alpha'^2} \right) - P_F \right]. \quad (3)$$

В схемах на рис. 1 могут быть как прямые, так и криволинейные участки в случае их равной или большей изгибной жесткости. Условие равновесности может быть выполнено, например, через соотношение длин криволинейных и прямых участков:

$$l_{кр} = (0.5...0.6) \cdot l_{пр}, \quad l_{кр} = l_{пр} \cdot \sqrt{1 - 0.056 \cdot \varphi}, \quad (4)$$

где первое соотношение соответствует закреплению криволинейного участка «шарнир-шарнир», а второе «шарнир-заделка». Радиус криволинейного участка будет  $R = l_2/\varphi$ .

Изложенный подход основан на ступенчатом изменении собственной частоты и критической нагрузки конструкции при изменении числа промежуточных опор. Для плавного и непрерывного изменения значений коэффициентов опор необходимо добавить в промежуточные опоры изгибную жесткость  $C$ . Коэффициенты опор (табл.1) являются нелинейными функциями, которые аппроксимированы квадратичными функциями (5), коэффициенты которых по зонам жесткости приведены в табл. 2

$$\alpha'(C) = a_1 C^2 + a_2 C + a_3, \quad \alpha'^2(C) = b_1 C^2 + b_2 C + b_3, \quad \mu'(C) = c_1 C^2 + c_2 C + c_3. \quad (5)$$

Таблица 2

**Коэффициенты аппроксимирующих функций**

Зона	$C$	$\alpha'(C)$			$\alpha'^2(C)$			$\mu'(C)$		
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
I	0...7	-0,0102	0,163	1	-0,0182	0,3694	1	-0,0212	0,371	1
II	7...30	-3.6E-4	0,0268	1,545	-2,34E-3	0,14786	1,774	-0,002	0,11516	1,851
III	30...300	-6E-6	2,78E-3	1,948	-2,6E-5	0,01192	3,768	-1,18E-5	5,368E-3	3,355
IV	300...∞	0	0	2,266	0	0	5,134	0	0	4

Чтобы определить требуемую жесткость  $C$ , после расчета (1) необходимо выбрать схему закрепления, для которой значения коэффициентов опор  $\alpha'$  и  $\mu'$  будут немного меньше найденного критерия  $\alpha_{min}$ . Требуемая жесткость опор  $C$  определится из уравнения:

$$\frac{1}{\mu'(C)} = \frac{b}{a} - \frac{c}{\alpha'^2(C) \cdot a}, \quad (6)$$

где  $a = L^2 \cdot (\alpha_i \cdot \Delta T \cdot ES + P_F)$ ,  $b = \pi^2 EJ$ ,  $c = 4mL^4 [f_n]^2$ .

Решение уравнения 4-й степени (6) возможно аналитически способом Ю.А. Несмеева, для этого для требуемой зоны последовательно рассчитываем величины [2]:

$$B = \frac{c_2}{c_1} + \frac{b_2}{b_1}, F = \frac{c_3}{c_1} + \frac{b_2 c_2}{b_1 c_1} + \frac{b_3}{b_1} - \frac{a}{b \cdot c_1} - \frac{c}{b \cdot b_1}; \quad (7)$$

$$D = \frac{b_2 c_3 + b_3 c_2}{b_1 c_1} - \frac{a b_2 + c \cdot c_2}{b \cdot b_1 c_1}, E = \frac{b_3 (b \cdot c_3 - a) - c \cdot c_3}{b \cdot b_1 c_1}; \quad (8)$$

$$b_B = -F, c_B = BD - 4E, d_B = -D^2 - B^2 E + 4FE; \quad (9)$$

$$p = \frac{3c_B - F^2}{9a^2}, q = -\frac{F^3}{27} + \frac{F \cdot c_B}{6} + \frac{d_B}{2}; \quad (10)$$

$$\varphi = \arctg \left( \sqrt{\frac{p^3}{q^2} - 1} \right), u_1 = 2r \cdot \cos \left( \frac{\varphi}{3} \right) + \frac{F}{3}; \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + u_1 - F}, k_3 = \frac{u_1}{2} - \sqrt{\frac{u_1^2}{4} - E}. \quad (12)$$

Наконец, искомая относительная и абсолютная жесткость промежуточных опор равна:

$$C = 0,5 \cdot \left( -k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4k_3} \right), k = C \cdot EJ / l. \quad (13)$$

Проверить корректность полученного значения жесткости  $C$  можно, подставив его в функции  $\alpha'$ ,  $\mu'$  (5) и по формулам (2,3) определить значение требуемого параметра.

Помимо шарнирных промежуточных опор (рис.1) методика справедлива и для волноводных трактов со скользящими типами опорами с изгибной жесткостью  $C$ . Если скользящие опоры обладают трением скольжения, то при учете температуры в формулах (1), (2) температурное усилие  $\alpha_t \Delta T \cdot ES$  может расти только до величины силы трения в опоре.

### Библиографические ссылки

1. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Т.3. М.: Машиностроение, 1988. 567 с.
2. Кудрявцев И. В., Иванов В.А., Суходоева Н.В. и др. Управление динамическими параметрами плоской балочной конструкции посредством выбора закреплений // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 2023. № 3. С.106–122.
3. Кудрявцев И.В. Обеспечение динамического состояния прямолинейных волноводных трактов при нагреве с помощью расстановки опор // Вестник МАИ. 2021. Т.28. №4. С.92-105.

### References

1. Birger I.A. Prochnost', ustojchivost', kolebanija. M.: Mashinostroenie, 1988. 567 p. (In Russ.).
2. Control of the dynamic parameters of a flat beam structure by selection of fixing / Kudryavtsev I.V., Ivanov V.A., Sukhodoeva N.V., etc. // Mechanics of Solids. 2023. Vol. 58. No.3. pp. 1–14.
3. Kudryavtsev I.V. Ensuring dynamic state of straight waveguide paths at heating by supports arrangement // Aerospace MAI Journal. 2021. Vol.28. №4. p. 92-105. (In Russ.).

© Кудрявцев И. В., 2023

УДК 629.78

## ПРОБЛЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ю. Д. Кузаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ura99fd@gmail.com

*В представленных материалах рассматривается проблема транспортировки ракет-носителей в Российской Федерации. Проведен анализ специфики процесса транспортировки на примере ракет-носителей «Энергия» и «Союз-2.1а». Отражены перспективные технологии транспортировки.*

*Ключевые слова: транспортировка, ракета-носитель, нестандартное оборудование.*

## THE PROBLEM OF TRANSPORTING LAUNCH ROCKETS IN RUSSIAN FEDERATION

Yu. D. Kuzakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ura99fd@gmail.com

*The presented materials discuss the problem of transportation launch vehicle in the Russian Federation. An analysis of the specifics of the transportation process was carried out using the example of the «Energia» and «Soyuz-2.1a» launch vehicles. Promising transportation technologies are reflected.*

*Keywords: transportation, launch vehicle, custom equipment.*

Ракеты-носители используются для вывода научного и технологического оборудования в космическое пространство. В настоящее время существует несколько способов транспортировки ракет-носителей к месту старта в зависимости от их размера, назначения и других факторов. Основными способами в отечественной космонавтике являются транспортировка железнодорожным транспортом и авиатранспортом. От способа транспортировки зависят сроки запуска, обеспечение надежности и безопасности установки, порядок проведения предстартовых мероприятий. Рассмотрим ниже особенности процесса транспортировки на примере ракет-носителей «Энергия» и «Союз-2.1а».

Ракета-носитель «Союз-2.1а» в соответствии с технологией транспортировки укомплектовывается в специальные вагоны (рис. 1) для перевозки от завода-изготовителя к месту старта [1]. В таком виде установки доставляется на космодром «Восточный» с последующей сборкой на месте.

Преимуществами данного способа транспортировки является независимость от погодных условий, малые экономические затраты относительно других способов. Недостатками данного способа транспортировки является долгое время доставки из предприятия-изготовителя до космодрома, наличие нескольких этапов сборки-разборки, а также изготовление специальных вагонов для транспортировки.

Другим вариантом транспортировки является транспортировка с использованием воздушного транспорта. Например, детали ракеты-носителя «Энергия» доставлялись на космодром «Байконур» с помощью специального самолета МЗ (рис. 2) [2].

Преимуществами данного способа является высокая скорость транспортировки на космодром, возможность изготовления деталей ракеты-носителя на разных предприятиях. Недостатками данного метода являются дороговизна транспортировки, разработка специального самолета, зависимость от погодных условий.

В отдельных случаях транспортировка осуществляется с помощью автомобильного транспорта [3]. Преимуществом данного метода является возможность транспортировки из любой точки при наличии автомобильных дорог. В качестве недостатков необходимо отметить значительные сроки транспортировки, необходимость изготовления специальных грузовых платформ, перекрытие автомобильного сообщения на время транспортировки.

Таким образом на данный момент не существует универсального способа транспортировки ракет-носителей, сочетающего в себе скорость транспортировки, малые экономические затраты, и независимость от погодных условий. Каждый из реализуемых способов обладает определенными недостатками.

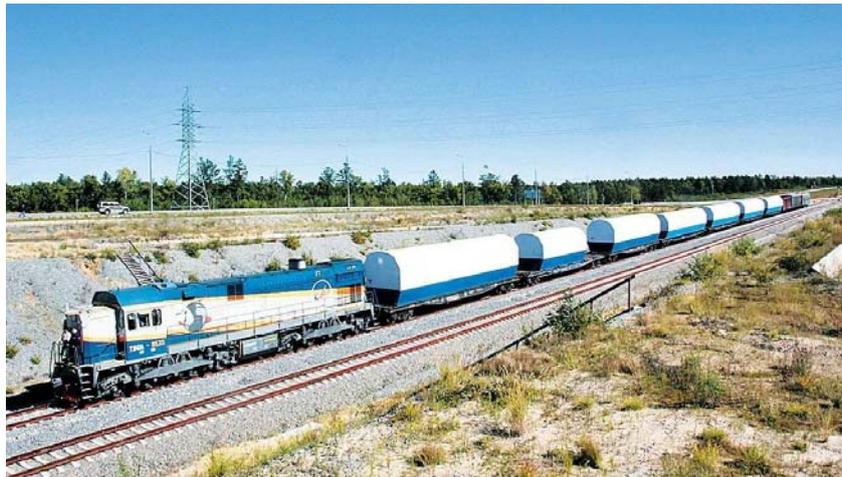


Рис. 1. Транспортировка «Союз-2.1а» в специальных вагонах



Рис. 2. Транспортировка деталей «Энергии» с помощью самолета МЗ

Оптимизация технологии транспортировки ракет-носителей является перспективной задачей современной космической техники, от решения которой зависит темп развития космической программы Российской Федерации.

#### Библиографические ссылки

1. Губанов Б. И. Триумф и трагедия «Энергии» [Электронный ресурс]. URL: <http://buran.ru/htm/16-3.htm> (дата обращения: 14.09.2023).
2. Ракета «Союз-2.1а» с кораблем «Союз MS-24» вывезена на стартовый комплекс Байконура [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aex.ru/news/2023/9/12/261884/> (дата обращения: 14.09.2023).
3. ГОСТ Р 56525–2015 Аппараты космические автоматические. Общие требования к транспортированию. М.: Стандартиформ. 2019. 11 с.

#### References

1. Gubanov B. I. Triumf i tragediya «Energii» [Elektronnyy resurs]. URL: <http://buran.ru/htm/16-3.htm> (data obrashcheniya: 14.09.2023).
2. Raketa «Soyuz-2.1a» s korablem «Soyuz MS-24» vyvezena na startovyy kompleks Baykonura [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.aex.ru/news/2023/9/12/261884/> (data obrashcheniya: 14.09.2023).
3. GOST R 56525–2015 Apparaty kosmicheskiye avtomaticheskiye. Obshchiye trebovaniya k transportirovaniyu. M.: Standartinform. 2019. 11 s.

© Кузаков Ю. Д., 2023

УДК 656.7.022.816

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРЫЛЬЧАТЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ В АВИАТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

В. В. Прохоров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Prohorov.victor@yandex.ru

*Использование крыльчатых двигателей цилиндрического вида в авиационной технике при решении проблем развития транспортной инфраструктуры в городских агломерациях.*

*Ключевые слова: крыльчатый двигатель, авиатранспортное средство, транспортная инфраструктура.*

## THE USE OF WING THRUSTERS IN AIR TRANSPORT VEHICLES

V. V. Prokhorov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Prohorov.victor@yandex.ru

*The use of cylindrical wing propellers in aviation technology in solving problems of transport infrastructure development in urban agglomerations.*

*Keywords: wing propulsion, air transport vehicle, transport infrastructure.*

Развитие крупных городов, как в Российской Федерации, так и зарубежом значительно ограничивается существующей там транспортной инфраструктурой. При этом даже массовая автомобилизация городского населения не решает имеющиеся транспортные проблемы.

Причиной этому является то, что в городах развитие наземного и подземного транспорта ограничивается отсутствием свободного пространства. При этом использование еще имеющегося в пределах городов свободных территорий приводит только к росту стоимости строительства новых транспортных коммуникаций, что даже не для всех крупных городских агломераций финансово посылно.

Поэтому в существующих условиях объективно одним из основных направлений развития транспортной инфраструктуры в крупных населенных пунктах является использование воздушного пространства. Но и здесь имеются также определенные ограничения, которые вызваны конструктивными особенностями современных авиатранспортных средств.

Так вертолеты, несмотря на наличие вертикального взлета и посадки, режима зависания и т. д. имеют высокий уровень издаваемого шума. В свою очередь использование авиатранспортных средств самолетного типа потребует определенного свободного пространства, которое является дефицитным в современных условиях. Существующие ограничения могут быть сняты за счет использования авиационной техники вертикального взлета и посадки на основе применения крыльчатых двигателей цилиндрического вида.

Сам крыльчатый двигатель представляет собой устройство по созданию подъемной и тяговой сил летательного аппарата. Он конструктивно выглядит, как цилиндрический ротор, по окружности которого на равных угловых расстояниях расположены крылообразные лопасти, которые совершают круговые движения вместе с ротором и колебательные движения вокруг собственных осей, лежащих на цилиндрической поверхности ротора. Сами колебательные движения лопастей по циклу вращения ротора, задаются эксцентриковым механизмом, которые передаются системой управления (рис. 1). Вращение ротора приводится внешним двигателем [1].

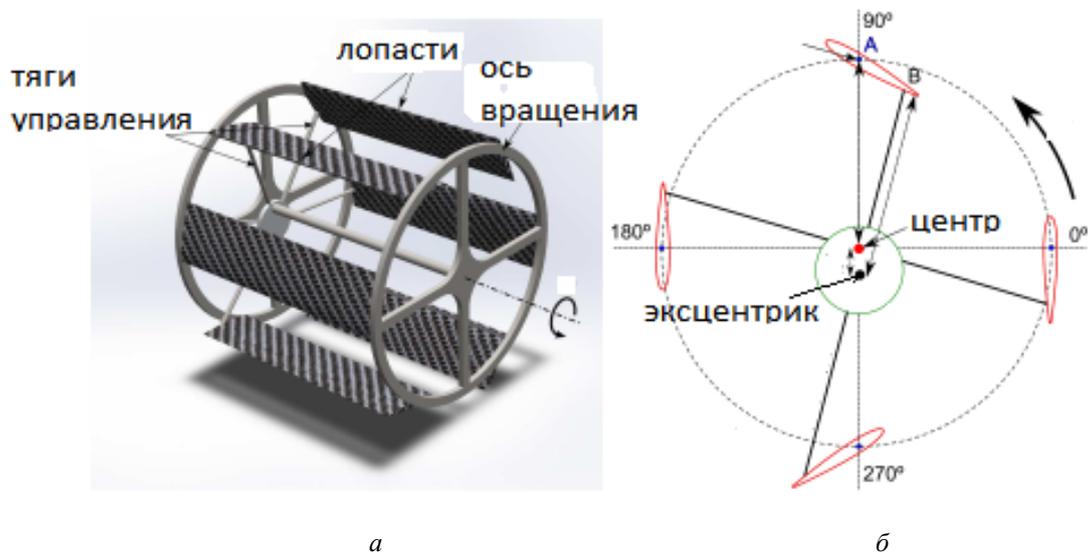


Рис. 1 Устройство крыльчатого движителя (а) и схема его работы (б) [5].

В Российской Федерации работы по созданию летательного аппарата на основе использования крыльчатых движителей цилиндрического вида в инициативном порядке ведет научно-исследовательская группа «Арей» (начало работ 2002 год). Концептуальный образ летательного аппарата использующего крыльчатые движители цилиндрического вида данной научно-исследовательской группы представлен на рис. 2. [2].

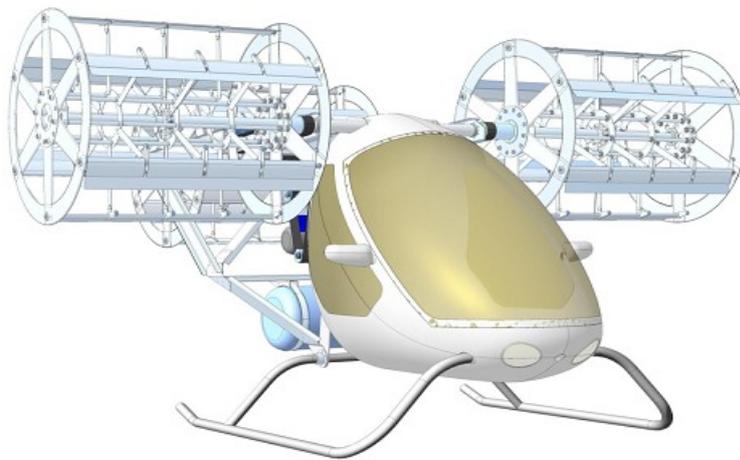


Рис. 2. Концептуальный образ летательного аппарата использующего крыльчатые движители

Для определения оптимальной размерности, как крыльчатого движителя цилиндрического вида, так и самого летательного аппарата НИОКР научно-исследовательской группой «Арей» проводятся на условиях постепенного увеличения размерности крыльчатого движителя. В настоящее время ведутся работы по проектированию крыльчатого движителя цилиндрического вида с диаметром 0,78 м с шестью лопастями и их длиной в 0,85 м. Площадь поверхности его цилиндра составила 2 м<sup>2</sup> с общим весом ротора в 15 кг и мощностью 9 кВт. Обороты крыльчатого движителя составили 1400 об/мин. Расчетная тяга с ротора достигла 50 кг, а удельная тяга с мощности 6 кг/кВт. Хорда лопасти составила 0,12 м. Профиль – 18 %. Тяга, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения, составила 75 кг/м<sup>2</sup>. Безразмерный коэффициент  $C_y$ , приведенный к площади цилиндра ротора, составил 0,13 (рис. 2) [3–4].

Анализ результатов НИОКР по разработке перспективного летательного аппарата на основе использования крыльчатого двигателя позволил выявить ряд преимуществ перед классическими вертолетами. К ним можно отнести, в том числе: малошумность; малозаметность; маневренность; высокие удельные характеристики; возможность причаливания к вертикальным и наклонным поверхностям; многозадачность и многофункциональность; всепогодность; возможность эксплуатации в сложных, горных и городских условиях; компактность; безопасность; защищенность [5]. Все это в целом позволяет говорить о возможности использования данного летательного аппарата в качестве транспортного средства в крупных городах.

#### Библиографические ссылки

1. Atanu Halder, Moble Benedict. Nonlinear Aeroelastic Coupled Trim Analysis of a Twin Cyclocopter in Forward Flight. AIAA JOURNAL Vol. 59, No. 1, January 2021, pp. 305-319. Downloaded by 87.250.222.20 on January 23, 2023 | <http://arc.aiaa.org> | DOI: 10.2514/1.J059122
2. Группа «Арей». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arey-group.ru> (дата обращения: 11.08.2023).
3. Крыльчатые двигатели как основа авиатранспортной техники новых возможностей. От авиатранспортного средства к транспортной среде: монография /Оборин Л.А., Прохоров В.В., Мельников В.П. [и др], под науч. ред. Л.В. Оборина Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Сиб. фед. ун-т., 2022. 180 с. ISBN: 978-5-86433-914-5
4. Viktor Prokhorov, Vladimir Sarchenko, Lev Oborin, Viktor Melnikov and Sergey Khirevich. Rotating blade propellers in prospective aviation technology. E3S Web of Conferences 403, 07032 (2023), ESCP-2023 | <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340307032>.
5. Прохоров В.В. Формирование транспортной инфраструктуры в городских агломерациях. Управленческий учет. 2023, N 1, стр. 471-477.

#### References

1. Atanu Halder, Moble Benedict. Nonlinear Aeroelastic Coupled Trim Analysis of a Twin Cyclocopter in Forward Flight. AIAA JOURNAL Vol. 59, No. 1, January 2021, pp. 305-319. Downloaded by 87.250.222.20 on January 23, 2023 | <http://arc.aiaa.org> | DOI: 10.2514/1.J059122
2. Ares Group. [electronic resource]. URL: <https://www.arey-group.ru> (accessed: 11.08.2023).
3. Cruise engines as the main aviation technology new opportunities. From an air transport vehicle to a transport environment: monograph /Oborin L.A., Prokhorov V.S., Melnikov V.P. [dr], pod naukh. red. L.S. Okorina-Krasnoyarsk: SibGU named after M. F. Reshetnev, Sib. FRS. Univ., 2022. 180 P. ISBN: 978-5-86433-914-5
4. Viktor Prokhorov, Vladimir Sarchenko, Lev Oborin, Viktor Melnikov and Sergey Khirevich. Rotating blade propellers in prospective aviation technology. E3S Web of Conferences 403, 07032 (2023), ESCP-2023 | <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340307032>.
5. Prokhorov V.V. Formation of transport infrastructure in urban agglomerations. Management accounting. 2023, N 1, pp. 471-477.

© Прохоров В. В., 2023

УДК 629.762

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN ULTRA-LIGHT ROCKETS

E. A. Rozhkova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: e\_rozhok@vk.com

*The article contains information about ultra-light launch vehicles in the space industry, designed using composite materials and additive manufacturing technologies to reduce the weight of the rocket and the cost of launching the payload.*

*Keywords: launch vehicle, composite materials, additive technologies, 3D printer, cost.*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАКЕТАХ СВЕРХЛЕГКОГО КЛАССА

Е. А. Рожкова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: e\_rozhok@vk.com

*Статья содержит информацию о ракетах-носителях сверхлегкого класса в космической отрасли, спроектированных с применением композитных материалов и аддитивных технологий изготовления, позволяющих уменьшить вес ракеты и стоимость выведения полезного груза.*

*Ключевые слова: ракета-носитель, композиционные материалы, аддитивные технологии, 3D-принтер, стоимость.*

The low mass of ultra-light rockets in the development of astronautics was due to technical and technological limitations, as well as the low weight of the potential payload. Subsequently, the development of the production of small spacecraft contributed significantly to the reduction in the mass and dimensions of launch vehicles. [1] Currently, this trend is a sustainable vector for the development of rocket and space technology with the goal of reducing the cost and increasing the availability of space services for the mass consumer.

The implementation of super-light rockets has allowed organizations to conduct cost-benefit analysis, particularly choosing between launching a single heavy or super-heavy rocket and multiple light and super-light rockets. Even a non-professional can notice a significant difference between heavy and super-light rockets – it lies in the rocket's dimensions, and equally important is the material that can make the structure hundreds of times lighter.

To delve into the comparison of launch vehicles, we need to understand what makes a rocket lighter, which component in the design are replaced, and which ones are retained.

The manufacturer of metal additive systems, SLM Solutions, produced an engine for the British aerospace company Orbex, touted as the world's largest rocket engine created using 3D printing. The engine for the commercial orbital launch vehicle Prime was printed as a solid metal item on a 3D printer and will be used to transport small satellites into orbit. The engine was made of a nickel alloy, and the additive manufacturing method allowed Orbex to reduce time and costs by 90% compared to traditional mechanical processing. According to experts, this manufacturing method allowed the Prime rocket to be 30% lighter and 20% more efficient than any other rocket in its category. [2]

The Electron rocket was developed by the New Zealand division of the American private aerospace company Rocket Lab. The rocket's "Rutherford" engines represent the first practical application of electric pumped fuel for the orbital launch vehicle [3]. Rutherford is Rocket Lab's proprietary engine, with all its major components created using 3D printing. The Electron rocket is equipped with a composite fairing measuring 2.5 meters in length, 1.2 meters in diameter, and weighing about 50 kg.

The Japanese small-lift launch vehicle SS-520 is a two-stage rocket, with the first stage launched from the main S-520 booster. In the second stage, the heavier S-520 payload had an aerodynamic margin that was more reliable than ever. The entire casing of the second-stage engine is made of carbon fiber. [4]

The small-class launch vehicle Firefly Alpha is the world's most advanced rocket for launching small satellites weighing up to 1000 kg, providing the highest payload capacity per kilogram at a low cost in its class of vehicles.

Firefly uses advanced carbon fiber composites throughout the Alpha's body, including state-of-the-art contactless cryogenic fuel tanks. Composite materials are ideal for rocket structures due to their high strength, low density, and usable material properties. This allows Firefly Alpha to lift heavier payloads than a comparable metallic rocket. [5]

The single-stage solid fuel launch vehicle Cab-3A, developed by the American company CubeCab, is exclusively designed to launch nanosatellites ranging from 1U to 3U in size. Additive technologies will be widely used in the rocket's production.

The lightweight super-class modular rocket family "Taimyr" is the main project of "Lin Industrial". It received positive evaluations from experts at the Cluster of Space Technologies and Telecommunications of the Skolkovo Foundation. The rocket will utilize advanced composite materials, including carbon fiber, carbon-carbon composites, and organoplastics. Control will be carried out using gas nozzles and lattice ribs. The fuel and oxidizer tanks have a cylindrical shape with spherical segmental bottoms and are made of composite materials.

Table 1

**Main characteristics of promising ultra-small launch vehicles**

Name LV	Launch weight, tons	Payload for launch into SSO, kg	Cost of launching 1 kg of payload, \$	Application of AT or KM in the design of LV
Prime	18	150	-	3D printing of the engine
Vector-R	5	26	77 000	3D printed engine injector
Vector-H	11,91	95	42 000	Carbon CM main body, 3D printed engine injector
Electron	12,55	225	25 000	The body and fuel tanks of the stages are made of carbon fiber, the engine is created using 3D printing
SS-520	2,6	4	875 000	The second stage body is made of carbon fiber
Firefly Alpha	19	200	20 000	The body and fuel tanks are made of carbon fiber reinforced composite material
Cab-3A	13	5	50 000	3D printing
Таймыр-7	15,6	85	40 000	Tanks are made of composite materials

The table in Figure 1 shows that as the launch mass of the carrier rocket decreases, the cost of deploying the payload increases. This is due to the high cost of manufacturing rocket components from composite materials. To minimize costs and reduce launch expenses, manufacturers often selectively use certain structural elements of the carrier rockets (fuel compartments, components of fuel tank rigging, transition compartments).

In conclusion, it can be inferred that there will be an expansion in the future use of light-class carrier rockets. Examples of such rockets like Firefly Alpha, SS-520, and Electron demonstrate their effectiveness in reducing the cost of deploying the payload.

### References

1. Klyushnikov V. Yu. Ultralight launch vehicles: a niche in the market of launch services and promising projects // Aerospace sphere. 2019. No. 3. pp. 58-71.
2. 3D Printing Industry The Authority on 3D Printing [Electronic resource]. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/orbex-commissions-europes-largest-industrial-3d-printer-for-rapid-rocket-engine-production-185142/> (accessed: 02/14/2023).
3. NASASpaceFlight.com [Electronic resource]. URL: <https://www.nasaspaceflight.com/2017/05/rocket-labs-electron-inaugural-flight-new-zealand/> (access date: 02/14/2023).
4. Japan Aerospace Exploration Agency [Electronic resource]. URL: [https://global.jaxa.jp/projects/rockets/s\\_rockets/](https://global.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/) (access date: 02/16/2023).
5. Alpha Launch Vehicle Firefly Aerospace [Electronic resource]. URL: <https://fireflyspace.com/alpha/> (access date: 02/18/2013).

### Библиографические ссылки

1. Ключников В. Ю. Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. 2019. №3. С. 58-71.
2. 3D Printing Industry The Authority on 3D Printing [Электронный ресурс]. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/orbex-commissions-europes-largest-industrial-3d-printer-for-rapid-rocket-engine-production-185142/> (дата обращения: 14.02.2023).
3. NASASpaceFlight.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nasaspaceflight.com/2017/05/rocket-labs-electron-inaugural-flight-new-zealand/> (дата обращения: 14.02.2023).
4. Japan Aerospace Exploration Agency [Электронный ресурс]. URL: [https://global.jaxa.jp/projects/rockets/s\\_rockets/](https://global.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/) (дата обращения: 16.02.2023).
5. Alpha Launch Vehicle Firefly Aerospace [Электронный ресурс]. URL: <https://fireflyspace.com/alpha/> (дата обращения: 18.02.2023).

© Рожкова Е. А., 2023

УДК 681.7.069.24

## ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

М. С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com

*В работе представлены результаты лазерной обработки поверхностей конструкционных материалов используемые в ракетно-космической техники. Проанализировано влияние мощности лазерного излучения на поверхность материалов.*

*Ключевые слова: лазерная обработка, конструкционные материалы, ракетно-космическая техника.*

## INFLUENCE OF LASER PROCESSING ON STRUCTURAL MATERIALS OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

M. S. Rudenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com

*The paper presents the results of laser processing of surfaces of structural materials used in rocket and space technology. The influence of laser radiation power on the surface of materials is analyzed.*

*Keywords: laser processing, structural materials, rocket and space technology.*

Лазерная обработка является эффективным способом нанесения запрограммированного микро-рельефа на поверхность конструкционных материалов [1; 2]. В элементах ракетно-космической техники создание искусственной шероховатости позволяет:

- Увеличить теплозащиту за счет улучшения теплоотвода с поверхности элемента;
- Повысить адгезии поверхности в клеевых соединениях космического аппарата;
- Улучшить аэродинамических характеристик летательного аппарата.

Лазерный луч создаёт на различных материалах различные микро-рельефы, которые отличаются друг от друга по форме и структуре. В данной работе наглядно представлено влияние режимов лазерной обработки на разные конструкционные материалы. В качестве материалов исследования выбраны: титановый сплав ОТ-4, нержавеющая сталь марки 08X18H10, алюминиевый сплав АмГ-6, Алюминий-литиевые сплав ВАД-23.

Лазерная обработка поверхности проводилась на иттербиевом импульсном волоконном лазере (IPG, YLPM-1- 4×200-20-20) с длиной волны 1,064 мкм, и энергией в импульсе 1 мДж. В работе определялось влияния одного параметров лазерной обработки: мощность лазерного излучения (5, 10, 15, 20 Вт) на параметры рельефа поверхности различных материалов. За одну обработку лазерный луч проходил дважды по поверхности материалов. Постоянными принимались следующие параметры лазерной обработки: скорость перемещения луча (200 мм/с) и частота следования импульсов (40 кГц). Схема перемещения лазерного луча представляет собой двунаправленную штриховку по одной оси, шаг между линиями составляет 66 мкм. Площадь обработки составляла  $5 \times 10 \text{ мм}^2$ .

Для качественного анализа микроструктуры и микро-рельефа обработанных лазером поверхностей использовали оптический металлографический микроскоп (Neophot-32, Carl Zeiss, Германия).

На рис. 1 представлена микроструктура поверхности различных материалов в зависимости от режимов обработки.

В процессе обработки, лазерное излучение, достигая поверхности материала, локально расплавляет его, плазменный факел создает высокое внутреннее давление, выталкивающее расплавленный металлический материал от центра лазерного луча, к периферии, где он затвердевает в течение коротко-

го времени. В результате этих процессов на поверхности формируются канавки, динамика образования которых представлена на рис. 1. При увеличении до определенной мощности лазерного излучения глубина канавок увеличивается, но при более высоких мощностях может происходить частичное или полное разрушение стенок микроканавок.

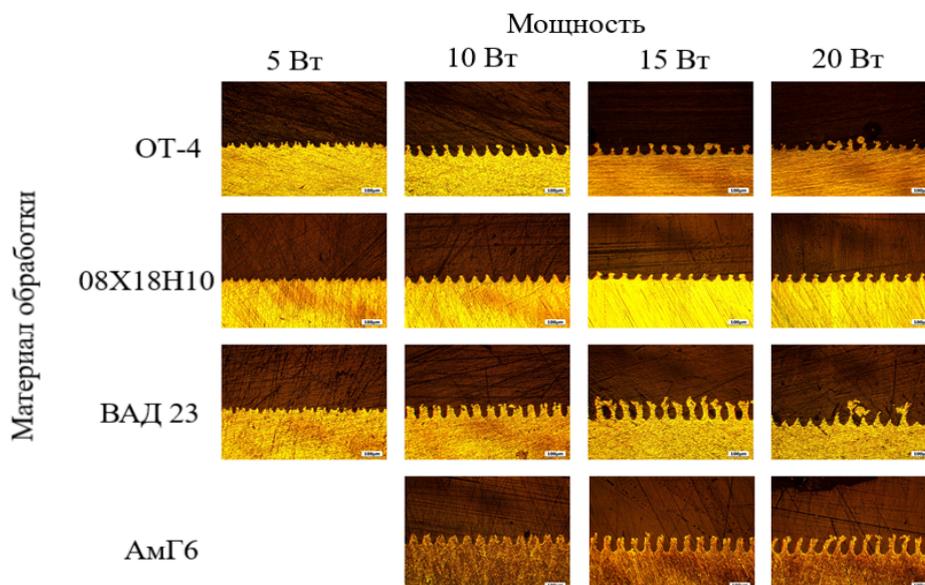


Рис. 1. Микроструктура поверхности конструкционных материалов от режима обработки

Влияние лазерного луча на поверхность титанового сплава ОТ-4 широко представлено в работе [3].

У более пластичных материалов ВД23 и АмГ-6 создается более глубокая структура поверхности, чем у ОТ-4 и нержавеющей стали. Но если при мощности 20 Вт у АмГ-6 стенка не разрушается, у ВД23 это наблюдается, можно предположить, что это связано с легированием литием в сплаве. У нержавеющей стали при увеличении мощности глубина канавок растёт незначительно.

Глубину выедания канавок лазером можно соотнести с теплопроводностью материала и температурой плавления, что требует более глубокого исследования и моделирования процесса.

### Библиографические ссылки

1. Hailang Wan, Junying Min, Jianping Lin et al. Effect of laser spot overlap ratio on surface characteristics and adhesive bonding strength of an Al alloy processed by nanosecond pulsed laser. *Journal of Manufacturing Processes* 2021, Vol. 62, P. 555–565.
2. F. Moroni, F. Musiari, C. Favi. Influence of the laser ablation surface pre-treatment over the ageing-resistance of metallic adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2021 Vol. 105, No 102764.
3. Гирн А. В., Руденко М. С., Тайгин В. Б., Михеев А. Е., Раводина Д. В. Влияние лазерной обработки поверхности титановых образцов на адгезионную прочность клеевых соединений // *Космические аппараты и технологии*. 2022. Т. 6. № 2. С. 90-99. doi: 10.26732/j.st.2022.2.03

### References

1. Hailang Wan, Junying Min, Jianping Lin et al. Effect of laser spot overlap ratio on surface characteristics and adhesive bonding strength of an Al alloy processed by nanosecond pulsed laser. *Journal of Manufacturing Processes* 2021, Vol. 62, P. 555–565.
2. F. Moroni, F. Musiari, C. Favi. Influence of the laser ablation surface pre-treatment over the ageing-resistance of metallic adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2021 Vol. 105, No 102764.
3. Girn A. V., Rudenko M. S., Taygin V. B., Mikheev A. E., Ravodina D. V. [Vliyanie lazernoy obrabotki poverkhnosti titanovykh obraztsov na adgezionuyu prochnost' kleevykh soedineniy]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 2022. Vol. 6. No 2. S. 90-99. doi: 10.26732/j.st.2022.2.03 (In Russ.).

УДК 621.56

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. С. Рукавишникова, Н. А. Амельченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: rukavisnikovaanastasia292@gmail.com

*Рассмотрены виды термической обработки, влияющие на свойства деталей из титановых сплавов. Приведены рекомендации по термической обработке.*

*Ключевые слова: титан, термическая обработка, отжиг, закалка, деформируемость, интенсивная пластическая деформация.*

## THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY PARTS

A. S. Rukavishnikova, N. A. Amelchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: rukavisnikovaanastasia292@gmail.com

*The types of heat treatment affecting the properties of titanium alloy parts are considered. Recommendations for heat treatment are given.*

*Keywords: titanium, heat treatment, annealing, quenching, deformability, intense plastic deformation.*

Целью нашего исследования является изучение термической обработки титана и реакцию сплавов на циклы термообработки. Уровень данного исследования является теоретическим. Новизна исследования заключается в рассмотрении современных методов обработки титана.

Титановые сплавы в зависимости от химического состава и назначения подвергаются различным видам отжига, закалке и старению, химико-термической обработке [1]. Для нагрева используют вакуумное оборудование, что предотвращает наводороживание сплавов.

Термообработка снижает внутреннее напряжение в титане, улучшает его пластичность, обрабатываемость и стабильность размеров [2–3]. Прочность также повышается. Свойства, такие как сопротивление разрушению и усталостная прочность, улучшаются при высоких температурах.

Титан имеет две аллотропные формы,  $\alpha$  и  $\beta$ , и может быть легирован различными металлами, такими как алюминий, марганец, хром и другие [4]. Это изменяет температуру аллотропического перехода титана на рис.1. Элементы, повышающие температуру ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) – превращения (рис.1, а), способствуют стабилизации  $\alpha$  – твердого раствора и называются  $\alpha$  – стабилизаторами (алюминий, кислород, азот). Элементы, понижающие температуру ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) – превращения (рис.1, б, в), способствуют стабилизации  $\beta$  – твердого раствора и называются  $\beta$  – стабилизаторами (молибден, ванадий, ниобий, хром, марганец, железо). В сплавах титана с хромом, марганцем, железом происходит эвтектоидный распад  $\beta$  – фазы (рис. 1, в) с образованием  $\alpha$  и  $\gamma$  – фаз.

Титановые сплавы делятся на три группы в зависимости от структуры: сплавы со структурой  $\alpha$ -твердого раствора, сплавы со смешанной структурой ( $\alpha + \beta$ )-твердого раствора и сплавы со структурой  $\beta$ -твердого раствора. Только ( $\alpha + \beta$ ) и  $\beta$  сплавы упрочняются при термической обработке,  $\alpha$ -сплавы не упрочняются.

Алюминий является наиболее важным элементом, так как он присутствует во всех сплавах. Он увеличивает прочность, жаростойкость и сопротивление титановых сплавов к окислению при высо-

ких температурах. Элементы, стабилизирующие  $\alpha$ -фазу (кислород и азот), оказывают положительное влияние (увеличивают прочность) только при их небольшом содержании – до 0.15% O<sub>2</sub> и 0.04% N<sub>2</sub> соответственно. Более высокое содержание этих элементов делает сплавы хрупкими. Для создания ( $\alpha + \beta$ ) или  $\beta$  структуры в титановых сплавах их легируют определенным количеством  $\alpha$ -стабилизаторов (алюминий) и  $\beta$ -стабилизаторов (хром, молибден, ванадий и др.).

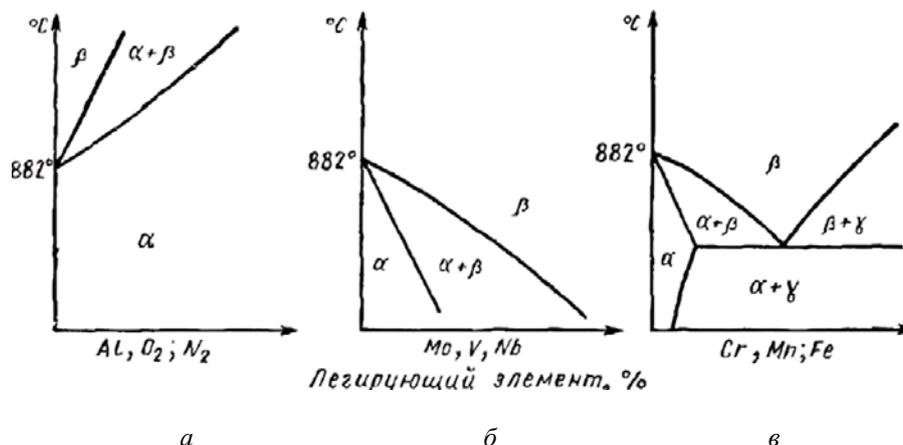


Рис. 1. Схема влияния легирующих элементов и примесей на температуру аллотропического превращения титана

Отжиг для снятия напряжений проводится при температурах 400 – 500°C. Отжиг рекристаллизационный после холодной деформации для снятия наклепа – при 800 – 850°C (в  $\beta$  – области происходит сильный рост зерна). Особенность титановых сплавов состоит в том, что, в отличие от сталей, отжиг является основным видом термообработки и при образовании гетерофазных структур обеспечивает достаточный уровень прочности.

Закалка и старение применяются только к сплавам с ( $\alpha + \beta$ ) структурой. Закалка с охлаждением в воде может быть проведена после нагреве в  $\beta$  или ( $\alpha + \beta$ ) – области. В последнем случае  $\alpha$  – фаза не претерпевает превращений, а из  $\beta$ -фазы образуется один из трех видов мартенсита или метастабильная  $\beta'$ - фаза (в зависимости от легирования). Закалка и старение вызывают значительное упрочнение по сравнению с отожженным состоянием, но сопровождается существенным снижением пластичности. Титановые сплавы имеют невысокую прокаливаемость, поэтому закалка на мартенсит применяется ограниченно, только для деталей небольших размеров. Более предпочтительной является закалка на  $\beta'$ - фазу, когда прокаливаемость не имеет значения, и нет ограничений по размерам детали [5].

Химико – термическая обработка титановых сплавов применяется для упрочнения поверхности и повышения износостойкости (азотирование) или повышения жаростойкости (силицирование – насыщение Si) или напыление нитрида титана.

Реакция титановых сплавов на термообработку зависит от состава сплава и влияния легирующих элементов на полиморфное  $\alpha$ - $\beta$  превращение титана. Поэтому не все циклы термообработки подходят для всех титановых сплавов, так как цели создания различных сплавов могут быть разными [6].

На основе анализа легирующих элементов и свойств титановых сплавов были определены требования к качеству и типу термической обработки. Экспериментально было установлено, что каждый тип обработки улучшает определенные свойства титана, и каждый сплав требует своего подхода.

### Библиографические ссылки

1. Назначение термической обработки титана и титановых сплавов [Электронный ресурс] URL: <https://www.kaysuns.com/ru/blog/термообработка-титана-и-титановых-сп/> (дата обращения: 26.08.2023).
2. Термическая обработка титановых сплавов [Электронный ресурс] URL: <https://studfile.net/preview/2015050/page:72/> (дата обращения: 26.08.2023).
3. Энциклопедия по машиностроению [Электронный ресурс] URL: <https://mash-xxl.info/page/007170095155102028158194215100221077076183098050/> (дата обращения: 10.09.2023).

4. Чечулин Б.Б., Ушаков С.С. и др. Титановые сплавы в машиностроении: Л.: Машиностроение, 1977. 248с.
5. Зубков Л.Б.. Космический металл: Все о титане: Наука, 1987.127с.
6. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник: ВИЛС-МАТИ, 2009.520с.

#### **References**

1. Purpose of heat treatment of titanium and titanium alloys [Electronic resource] URL: <https://www.kaysuns.com/ru/blog/термообработка-титана-и-титановых-сп/> (accessed: 08.26.2023).
2. Heat treatment of titanium alloys [Electronic resource] URL: <https://studfile.net/preview/2015050/page:72/> (date of address: 26.08.2023).
3. Encyclopedia of Mechanical Engineering [Electronic resource] URL: <https://mash-xxl.info/page/007170095155102028158194215100221077076183098050/>(date of address: 10.09.2023).
4. Chechulin B.B., Ushakov S.S., etc. Titanium alloys in mechanical engineering: L.: Mashinostroenie, 1977. 248s.
5. Zubkov L.B. Cosmic Metal: All about Titanium: Science, 1987.127s.
6. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Reference book: VILS-MATI, 2009.520s.

© Рукавишникова А. С., Амельченко Н. А., 2023

УДК 629.787

## АЭРОСТАТНЫЙ СПОСОБ ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

С. Д. Самсонов\*, В. В. Кольга

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: samsonoffstepan@yandex.ru

*В статье обоснован принцип посадки космического аппарата для исследования Венеры с торможением в атмосфере за счёт использования аэростата.*

*Ключевые слова: аэростат, Венера, космический аппарат, способ посадки*

## BALLOON METHOD OF LANDING A SPACECRAFT IN THE ATMOSPHERE OF VENUS

S. D. Samsonov\*, V. V. Kolga

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: samsonoffstepan@yandex.ru

*The article substantiates the principle of landing a spacecraft for the study of Venus, with braking in the atmosphere through the use of a balloon.*

*Keywords: aerostat, balloon, Venus, spacecraft, landing method*

Вопрос воздухоплавания сквозь вземную атмосферу, несмотря на активное обсуждение, слабо представлен на практике. Единственным историческим примером являются советские аппараты «Вега-1» и «Вега-2» (Венера-Галлей), во время снижения посадочных модулей, произведшие выпуск аэростатного зонда с последующим совершением модулем мягкой посадки. Аэростатные зонды, дрейфуя в атмосфере Венеры, передавали научную информацию в течение 46,5 часов, в то время как посадочные модули аппаратов «Вега-1» и «Вега-2» проработали 56 и 57 минут соответственно [1].

Таким образом, использование полноценного аэростатного аппарата для исследования Венеры, обеспечивающего мягкую посадку во вземной атмосфере, открывает новые исследовательские возможности в виду увеличения времени активной работы. После посадки на поверхность Венеры такой аппарат может проводить полноценные исследования планеты с использованием научного оборудования, доставленного с помощью аэростата.

Приблизительно оценим перспективы использования такого подхода.

Подъёмная сила аэростата возникает за счёт вытеснения им газа (закон Архимеда). Эта сила противоположно направлена силе притяжения, и для полёта на заданной высоте должна быть ей равна (ниже приведена формула после арифметических преобразований):

$$\rho V = M, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность атмосферы Венеры;  $V$  – объём вытесненного аппаратом газа (для приблизительного расчёта – объём аэростата);  $M$  – полная масса аппарата, состоящая из массы оболочки аэростата, массы заполняющего её газа и полезной массы аппарата [2]. При этом можно отметить, что величина ускорения свободного падения для воздухоплавательных аппаратов не играет никакой роли.

Определим массу посадочного модуля космического аппарата ( $m_n$ ). Масса наполняющего газа ( $m_r$ ) будет равна:

$$m_r = V\rho_r = \frac{1}{6}\pi d^3\rho_r \quad (2)$$

В качестве заполняющего газа предполагается использование гелия (He), так как более лёгкий водород подвержен утечке через оболочку аэростата [3]. Так как плотность гелия известна, неизвестным останется объём баллона аэростата. Для простоты расчетов примем сферический аэростат, диаметр которого будет являться неизвестным параметром.

Массу оболочки ( $m_0$ ) определим приблизительно, принимая в качестве материала оболочки фторопласт, использованный на КА «Вега» с плотностью  $\rho = 0,33 \text{ кг/м}^3$ , для различных параметров диаметра аэростата  $d$  [4]. Массу оболочки ( $m_0$ ) будет, таким образом, равна:

$$m_0 = S\rho_0 = \pi d^2 \rho_0. \quad (3)$$

Таким образом, общая масса посадочного модуля ( $m_{\text{п}}$ ) будет равна:

$$m_{\text{п}} = \frac{1}{6} \pi d^3 \left( \rho - \left( \rho_{\text{He}} \frac{T_0 p}{p_0 T} \right) \right) - \pi d^2 \rho_0, \quad (4)$$

где масса посадочного модуля  $m_{\text{п}}$  является неизвестной величиной, зависящей от параметра  $d$  – диаметра аэростата;  $\rho_{\text{He}}$  – плотность гелия при нормальных условиях;  $T_0$  и  $T$  – температура, а  $p$  и  $p_0$  – давление, при нормальных условиях и в атмосфере Венеры соответственно.

Однако параметры атмосферы Венеры зависят от высоты над поверхностью планеты (рис. 1) [5]. Поэтому найдём оптимальную высоту дрейфа аэростата для постоянного диаметра аэростата  $d = 1 \text{ м}$  с учетом температуры окружающей среды, непосредственным образом влияющей на срок службы аппаратуры. За предельное значение возьмём  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  [6].

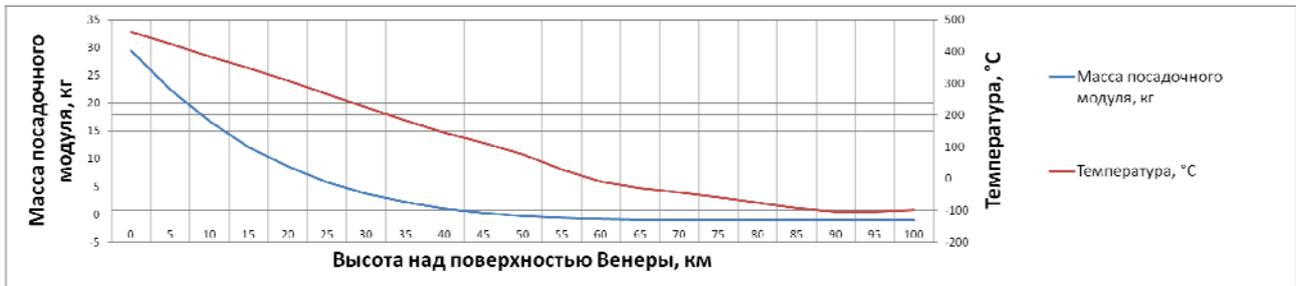


Рис. 1. График зависимости массы посадочного модуля и температуры от высоты над поверхностью Венеры

Из вычисленных данных оптимальной высотой дрейфа следует считать  $h = 50 \text{ км}$ . Рассчитаем возможную массу посадочного модуля для различных диаметров аэростата (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость массы посадочного модуля от диаметра аэростата

$d, \text{ м}$	$m_{\text{п}}, \text{ кг}$								
1	0,00	6	124,94	11	874,44	16	2811,62	21	6499,90
2	1,86	7	206,87	12	1148,83	17	3391,16	22	7497,27
3	10,95	8	318,28	13	1475,24	18	4045,25	23	8591,73
4	31,49	9	463,67	14	1858,16	19	4778,40	24	9787,78
5	67,99	10	647,55	15	2302,12	20	5595,11	25	11089,94

Увеличение высоты дрейфа приведёт к уменьшению возможной массы аппарата, но за счёт понижения температуры продлит срок его эксплуатации.

Уменьшение высоты дрейфа позволит увеличить массу посадочного модуля, однако потребует термостойкого научного оборудования.

Таким образом, посадочный модуль, дрейфующий в атмосфере Венеры на высоте 50 километров, может обладать значительной массой, что в совокупности с увеличенным сроком эксплуатации за счёт менее экстремальных условий открывает большие перспективы в исследовании Венеры.

### Библиографические ссылки

1. Карфидов В.Ю. Космонавтика. Краткий справочник в 6-ти томах. Том 1. Космонавтика СССР / России. Люберцы. 2021. 768 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. 11-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 558 с.
3. Bonnici, M., Tacchini, A. & Vucinic, D. Long permanence high altitude airships: the opportunity of hydrogen. *Eur. Transp. Res. Rev.* 6, 253–266 (2014) [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0123-z> (дата обращения: 10.09.2023).
4. NASA Space Science Data Coordinated Archive [Электронный ресурс]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1984-125F> (дата обращения: 11.09.2023).
5. Geoffrey A. Landis, Anthony Colozza, Christopher M. LaMarre. Atmospheric Flight on Venus. 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit sponsored by the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reno, Nevada, January 14–17, 2002.
6. Компоненты и технологии. [Электронный ресурс]. URL: <https://kit-e.ru/procprocessor-rad750-v-sistemah-s-ogranichennym-byudzhetom-moshhnosti/> (дата обращения: 11.09.2023).

### References

1. Karfidov V.Yu. Cosmonautics. A short guide in 6 volumes. Volume 1. Cosmonautics of the USSR / Russia. Lyubertsy. 2021. 768 p.
2. Trofimova T.I. Course of physics: textbook. manual for universities. 11th ed., ster. M.: Publishing Center "Academy", 2006. 558 p.
3. Bonnici, M., Tacchini, A. & Vucinic, D. Long permanence high altitude airships: the opportunity of hydrogen. *Eur. Transp. Res. Rev.* 6, 253-266 (2014) [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0123-z> (accessed: 09/10/2023).
4. NASA Space Science Data Coordinated Archive [Electronic resource]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1984-125F> (accessed: 09/11/2023).
5. Geoffrey A. Landis, Anthony Colozza, Christopher M. LaMarre. Atmospheric Flight on Venus. 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit sponsored by the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reno, Nevada, January 14-17, 2002.
6. Components and technologies. [electronic resource]. URL: [https://kit-e.ru/procprocessor-rad750-v-sistemah-s-ogranichennym-byudzhetom-moshhnosti](https://kit-e.ru/procprocessor-rad750-v-sistemah-s-ogranichennym-byudzhetom-moshhnosti/) (accessed: 11.09.2023).

© Самсонов С. Д., Кольга В. В., 2023

УДК 629.7.02

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШПОНОЧНО-БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ «КОМПОЗИТ-МЕТАЛЛ» В РАКЕТНОЙ ТЕХНИКЕ**

В. Р. Трухин, В. В. Кольга

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: vitalyaemae@gmail.com

*В статье рассматриваются силовые нагрузки на различные силовые схемы конструкций в ракетно-космической технике (РКТ). В работе предложены оптимальные варианты соединений «композит-металл».*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, композиционный материал, соединение, запас прочности.*

## **ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLYING KEYBOLT CONNECTION OF COMPOSITE-METAL MATERIALS IN ROCKET ENGINEERING**

V. R. Trukhin, V. V. Kolga

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: vitalyaema@gmail.com

*The article discusses power loads on various power circuits of structures in rocket and space technology. The work suggests optimal options for composite-metal connections.*

*Keywords: rocket and space technology, composite material, connection, margin of safety.*

Одной из проблем современной ракетно-космической отрасли является обеспечение требуемого уровня прочности и долговечности конструкций при увеличении уровней эксплуатационного нагружения и при одновременном снижении материалоемкости изделий. Эта проблема имеет особенную актуальность при разработке и модернизации изделий космической техники [1, с. 14].

Основная цель работы – исследовать возможность эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) из композиционных материалов (КМ) и применения комбинации «композит-металл».

Задачи работы – провести исследование несущей способности конструкции изделий РКТ, рассмотреть варианты использования различных композиционных материалов и выполнить оптимизационный анализ.

Перспективным направлением повышения прочности и снижения веса изделий является использование соединения «композит + металл». Для проведения сравнительного анализа было взято два различных способа соединения металлического днища и обечайки, состоящей из композиционного материала: самозаклинивающее соединение и резьбовое соединение. Современные технологии позволяют выполнять изделия сложных форм из композиционных материалов. Их использование позволяет значительно уменьшить массу конструкции и в то же время обеспечить необходимую прочность [2, с. 26].

В пакете Solidworks были построены модель самозаклинивающего соединения и модель резьбового соединения.

Далее в пакете Solidworks simulation было выполнено 4 вариации расчетов в зависимости от материалов для каждой модели, при этом в качестве материала обечайки взяты металлы.

По результатам расчетов были построены эпюры напряжений, перемещений и запаса прочности для моделей с самозаклинивающим и резьбовым соединением. По результатам статического анализа

моделей с двумя различными соединениями самый высокий коэффициент запаса прочности при обоих вариантах соединения имеют модели с комбинациями материалов *легированная сталь + углепластик высокопрочный* и *титан Ti-5Al-2.5Sn + углепластик высокопрочный* и равен он 1,4.

По результатам массового анализа моделей с двумя различными соединениями самой низкой массой обладают модели с комбинациями материалов *титан Ti-5Al-2.5Sn + углепластик высокопрочный* и *титан Ti-5Al-2.5Sn + углепластик высокопрочный*. Использование этих комбинаций позволяет выиграть в массе 42-44%.

В конструктивном плане оба соединения практически одинаковы по механическим и прочностным характеристикам. Но с точки зрения технологии производства, менее энергозатратным и простым в плане изготовления является самозаклинивающее соединение.

Массово-прочностные характеристики соединения с использованием самозаклинивающего принципа приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Окончательные выходные данные

Наименование комбинации материалов	Масса конструкции, кг	Максимальное напряжение, МПа	Коэффициент запаса прочности
Титан Ti-5Al-2.5Sn + Углепластик высокопрочный	980	$2,655 \cdot 10^8$	1,4

С целью повышения прочности, оптимизации по массе, а так также обеспечения технологичности производства с уменьшением дефектов и трудоемкости при изготовлении РДТТ из композитных материалов было предложено рассмотреть и рассчитать модель шпоночно-болтового соединения металлического днища с композиционной обечайкой.[3. с 4]

В пакете Solidworks была построена 3D модель данного соединения (рис. 1).

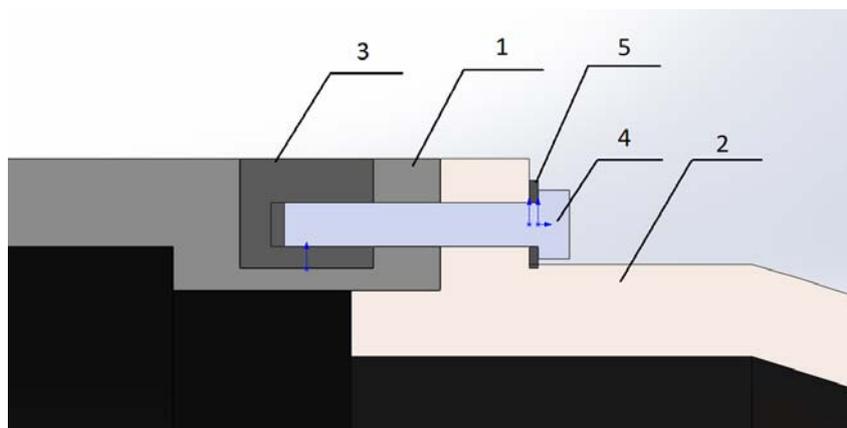


Рис. 1. Шпоночно-болтовое соединение  
1 – композиционная обечайка; 2 – металлическое днище;  
3 – шпонка; 4 – болт; 5 – шайба

Шпоночно-болтовое соединение выигрывает у других соединений композит-металл за счет того, что в нем основными силовыми элементами является металл. Композиты имеют низкую абсолютную прочность, низкие допустимые значения напряжения на скол и срез. При изготовлении обечайки на ее торцевых частях выполняют законцовки, толщина которых не менее чем в четыре раза больше толщины центральной стенки. В этих законцовках с наружной поверхности сверлят радиальные отверстия, в которые на клей устанавливаются штифты, как правило, из титанового сплава. До установки в штифте просверливается отверстие, ось которого параллельна его торцевой поверхности, и нарезается резьба под будущий болт. После установки штифта с торца обечайки просверливают отверстие, ось которого совпадает с осью резьбового отверстия в штифте. После стыковки днища с обечайкой их жестко скрепляют болтами. Такое соединение будет надежно при любой нагрузке при правильно выбранных его параметрах: толщине слоя композита до штифта, толщине законцовки, диаметрах штифта и болта, числе болтов [2, с. 49].

В дальнейших исследованиях будет выполнен прочностной и массовый анализ данного соединения, а так же сравнительный анализ с рассмотренным выше самозаклинивающим соединением для выявления наиболее надежного и оптимального по массе соединения.

### **Библиографические ссылки**

1. Балабух, Л. И. Строительная механика ракет: Учебник для машиностроительных спец. вузов / Л. И. Балабух, Н. А. Алфутов, В. И. Усюкин; Высшая школа, Москва, 1984. 26 с. Текст : непосредственный.
2. Кольга, В. В. Проектирование ракет с ракетным двигателем на твердом топливе: Учебное пособие; Сибирский государственный университет науки и технологии им. ак. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2004. 170 с.– Текст : непосредственный.
3. Научно-техническое развитие россии и мира: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Саратов: НОП «Цифровая наука». 2023. 294 с.

### **References**

1. Balabuh, L. I. Structural mechanics of rockets: Textbook for mechanical engineering specialists. universities / L. I. Balabuh, N. A. Alfutov, V. I. Usyukin; Graduate School, Moscow, 1984. 26 p. Text : direct. (In Russ.)
2. Kolga, V. V. Design of solid propellant rockets: Tutorial; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Krasnoyarsk, 2004. 170 p.– Text : direct. (In Russ.)
3. Scientific and technological development of Russia and the world: collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference.– Saratov: NOP “Digital Science”. 2023. 294 p. (In Russ.)

© Кольга В. В., Трухин В. Р., 2023

УДК 531.36

## АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ДЕЙСТВИИ КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

А. Чуйко

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34  
E-mail: tchuikoalisa@yandex.ru

*Рассматривается свободное движение спутника-гиростата относительно центра масс. Проведен анализ хаотических режимов движения спутников-гиростатов при действии внутренних кусочно-непрерывных возмущений.*

*Ключевые слова: спутник-гиростат, динамический хаос, возмущения, функция Мельникова, Сечение Пуанкаре.*

## ANALYSIS OF CHAOTIC MODES OF PERTURBED MOTION OF SOLID BODIES UNDER THE ACTION OF PIECEWISE CONTINUOUS PERTURBATIONS

A. Chuiko

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: tchuikoalisa@yandex.ru

*The free motion of a gyrost satellite relative to the center of mass is considered. Chaotic modes of gyrost satellite motion under the action of internal piecewise continuous perturbations are analyzed.*

*Keywords: gyrost satellite, dynamic chaos, perturbations, Melnikov function, Poincare section.*

В настоящее время важным и малоизученным явлением являются хаотические режимы движения спутников-гиростатов, их учет необходим в рамках планирования и реализации космических миссий, поскольку в таких режимах малая неточность в задании начального состояния системы с течением времени нарастает и процесс становится непредсказуемым, что может привести к нежелательным последствиям.

Целью данной работы является аналитическое и численно обнаружение хаотической динамики спутника-гиростата при действии внутренних кусочно-непрерывных возмущений.

В работе рассматривается свободное движение спутника-гиростата относительно центра масс. Данная система имеет четыре степени свободы (три степени свободы основного тела и дополнительная степень свободы ротора). Движение спутника-гиростата описывается динамическими уравнениями Эйлера, для которых существуют явные аналитические гетероклинические решения [1], описывающие движение вдоль сепаратрис в фазовом пространстве системы. На основе этих решений проведен анализ хаотических режимов возмущенного движения спутника-гиростата при действии кусочно-непрерывных возмущений. Такие внутренние возмущения могут появляться в системе управления космическим аппаратом вследствие ошибок датчиков угловой скорости [2] или других «паразитных» сигналов. Такие сигналы могут быть представимы в виде кусочно-заданных функций или в виде тригонометрического ряда Фурье.

Для обнаружения хаотической динамики в работе используется метод Мельникова [3], основанный на построении функции Мельникова простые нули которой свидетельствуют о наличии в системе хаотической динамики. Для реализации метода используются уравнения движения спутника-гиростата в гамильтоновой форме в переменных Андуайе-Депри [4]. Это позволяет свести систему с четырьмя степенями свободы к системе с одной степенью свободы. В работе была получена функция Мельникова, которая имеет простую полигармоническую структуру, а значит функция имеет множество простых нулей, для сравнения получена функция Мельникова в виде кусочно-непрерывной функции, которая также имеет простые нули.

В дополнении к аналитическому исследованию проведено численное моделирование системы, на основе которого построены сечения Пуанкаре [5] в пространстве компонент Андуайе-Депри. Они наглядно показывают появление хаотического слоя вблизи сепаратрис при наличии внутренних возмущений.

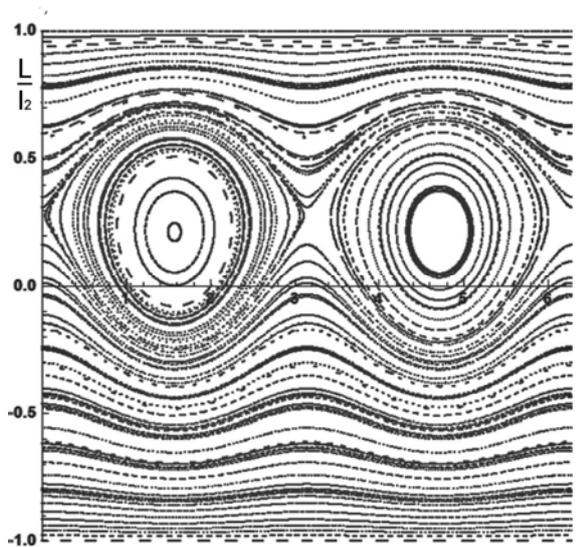


Рис. 1. Сечения Пуанкаре для невозмущенной системы

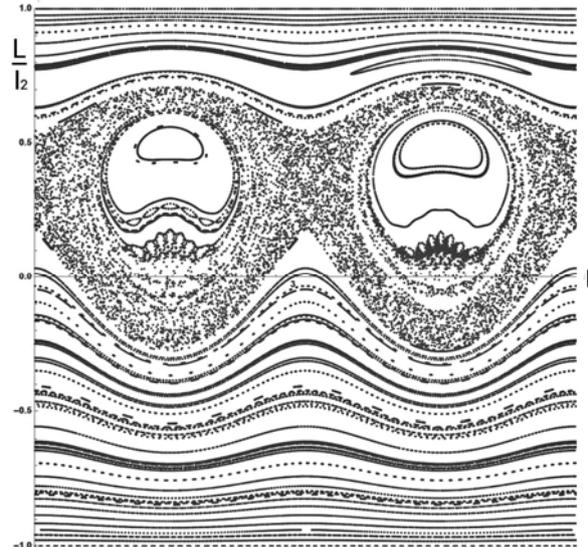


Рис. 2. Сечения Пуанкаре для возмущенной системы

Таким образом в работе аналитически и численно доказано наличие хаотической динамики в данной системе при действии кусочно-непрерывных возмущений. Хаос является опасным явлением для реальных спутников-гиростатов поэтому такая динамика нежелательна для практики космических полетов.

#### Библиографические ссылки

1. Doroshin, A.V. Heteroclinic dynamics and attitude motion chaotization of coaxial bodies and dual-spin spacecraft // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2012. Vol. 17 (3). P. 1460-1474.
2. Васильев, В.Н. Системы ориентации космических аппаратов. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ». 2009, С. 36-44.
3. Мельников В.К. Об устойчивости центра при периодических по времени возмущениях // *Труды Московского математического общества*. 1963. № 12. С. 1– 56.
4. Архангельский Ю.А. Аналитическая динамика твердого тела. М: Наука, 1977, С. 17-22.
5. С.П. Кузнецов. Динамический хаос. М: Физматлит. 2001, С. 107-116.

#### References

1. Doroshin, A.V. Heteroclinic dynamics and attitude motion chaotization of coaxial bodies and dual-spin spacecraft. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, Vol. 17 (3), P. 1460-1474.
2. Vasil'ev, V.N. *Sistemy orientatsii kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft orientation systems]. Moscow.: FGUP «NPP VNIIEМ». 2009. P. 36-44.
3. Mel'nikov V.K. [On stability of the center under time-periodic perturbations]. *Trudy Moskovskogo matematicheskogo obshchestva*. 1963, Vol 12, P. 1– 56. (In Russ.).
4. Arkhangel'skii Yu.A. *Analiticheskaya dinamika tverdogo tela* [Analytical dynamics of a solid body]. Moscow, Nauka Publ., 1977, P. 17-22.
5. S.P. Kuznetsov. *Dinamicheskii khaos* [Dynamic chaos]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, P. 107-116.



**Секция**

**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ  
ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

УДК 629.78; 620.178.53

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕСТА ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М. Е. Воронин<sup>1,3\*</sup>, С. Е. Матвиенко<sup>3</sup>, В. В. Двирный<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>3</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»

имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>4</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Северная, 1

\*E-mail: vormiha1@list.ru

*Рассмотрены требования к месту для вибрационных испытаний космических аппаратов. Предложено использование манипулятора для перемещения объекта испытаний, лазерных акселерометров для отслеживания ускорений, технического зрения для мониторинга технологического процесса, а также системы управления с искусственной нейронной сетью. Снижение временных затрат на производство космических аппаратов достигается использованием автоматизированного контроля процесса вибрационных испытаний.*

*Ключевые слова: серийное производство, автоматизация производства, вибрационные испытания, манипулятор, лазерный акселерометр, нейронная сеть.*

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED VIBRATION TEST SITE FOR SPACECRAFT UNDER SERIAL PRODUCTION CONDITIONS

M. E. Voronin<sup>1,3\*</sup>, S. E. Matvienko<sup>3</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»

52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>4</sup>Siberian Fire and Rescue Academy – branch of Saint-Petersburgh University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,

1, Severnaya str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\*E-mail: vormiha1@list.ru

*We considered the site requirements for vibration testing of spacecraft. The use of a manipulator for moving a test object, laser accelerometers for tracking accelerations, technical vision for monitoring the technological process, as well as a control system with an artificial neural network is proposed. The reduction in the production time of spacecraft is achieved by the use of automated control of the vibration test process.*

*Keywords: serial production, automation of production, vibration test, manipulator, laser accelerometer, neural network.*

В современном мире космическая отрасль активно развивается и совершенствуется. В 2022 году Россия провела 22 успешных запуска космических аппаратов, в 2023 году – 13 запусков [1]. Потребности растут, людям привычны навигация, мобильная связь, интернет. Госкорпорация «Роскосмос»

планирует создать сеть из 264 космических аппаратов для глобальной низкоорбитальной многоспутниковой системы передачи данных «Марафон IoT» [2], которая призвана работать в отрасли ретрансляции и связи. В дальнейшем планируется увеличить число выпускаемых аппаратов и ускорить процесс их изготовления, для чего требуется автоматизация максимального количества производственных процессов.

В целях обеспечения серийного производства космических аппаратов микрокласса массой менее 100 кг, требуемых для выполнения вышеописанного плана, целесообразно максимально автоматизировать стадии производственного процесса.

Одним из важнейших этапов производства космических аппаратов является проведение динамических, в частности вибрационных, испытаний готовых экземпляров изделий с целью выявления возможных дефектов, в том числе нарушений технологии изготовления, нарушений межблочных связей, и отслеживания отклонений от заданных характеристик.

В условиях серийного производства для проведения вибрационных испытаний необходимо создать рабочее место – предпочтительно изолированное, – оборудованное источником механических колебаний – вибрационным стендом, контроллером для его управления, вспомогательным оборудованием, манипулятором, измерительной системой с лазерными акселерометрами, системой технического зрения, а также модернизированной системой автоматического компьютерного управления.

На участок для проведения вибрационных испытаний серийной продукции посредством конвейера поступают технически сложные габаритные изделия, полностью квалифицированные, с требованиями по стойкости к вибрационным нагрузкам.

Вибрационный стенд должен быть смонтирован в соответствии с установленными требованиями [3] и иметь возможность поворота для работы в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Манипулятор, предназначенный для перемещения космического аппарата с конвейера на вибрационный стенд и обратно, размещается вблизи конвейера. Он должен обладать характеристиками, удовлетворяющими потребность в перемещении определенной модели космического аппарата, но при этом иметь некоторую универсальность для работы с иными подобными моделями аппаратов.

Лазерные акселерометры, необходимые для отслеживания нагрузок при испытаниях, устанавливаются стационарно рядом с местом их проведения и не требуют установки непосредственно на испытываемое изделие.

Для мониторинга технологического процесса и корректировки работы оборудования рабочее место должно быть оборудовано системой технического зрения, а также программной системой с искусственной нейронной сетью [4], рассчитанной на управление большинством процессов в автоматическом или полуавтоматическом режимах.

Кроме того, в месте для проведения вибрационных испытаний должен присутствовать альтернативный путь следования для аппаратов, которые не прошли испытания и должны быть отправлены на дополнительное исследование.

Собранные в ходе испытаний данные анализируются автоматизированной системой обработки результатов [5] и сравниваются с расчетными данными испытаний. Далее система автоматически либо с помощью сотрудников может доработать расчетную модель изделия посредством внесения фактических данных и расчета новых теоретических показателей. В случаях, когда данные, полученные от одного датчика (акселерометра), имеют стабильную и длительную повторяемость в заданных рамках нормы, подтверждая качество исполнения какого-либо узла космического аппарата, можно исключить такой датчик из расчетов, таким образом уменьшив количество используемых акселерометров. В результате улучшается достоверность расчетной модели изделия, уменьшается количество данных для анализа, а также количество времени, затрачиваемого на проверку единицы изделия, как следствие – упрощается и ускоряется процесс испытаний изделия в целом.

Создание автоматизированного места для вибрационных испытаний позволяет минимально использовать человеческий труд, но при этом необходимо не допустить снижения качества проведения испытательных работ, а потому итоговая оценка испытаний и принятие окончательного решения возлагается именно на человека. Несмотря на автоматизацию и, как следствие, упрощение работы сотрудника, его квалификация должна быть на высоком уровне.

#### Библиографические ссылки

1. Госкорпорация Роскосмос. Пуски. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/launch/2023> (дата обращения: 14.09.2023).

2. Госкорпорация Роскосмос. Новости. Предприятие Роскосмоса создаст более 130 спутников связи «Марафон» в интересах проекта «Сфера». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/39698> (дата обращения: 14.09.2023).
3. Сайт производителя ZETLAB. Требования к монтажу и электропитанию для электродинамических виброустановок. [Электронный ресурс] URL: <https://zetlab.com/podderzhka/vibratsionnyie-isyitaniya/provedenie-isyitaniy-suv/trebovaniya-k-montazhu-i-elektropitaniyu> (дата обращения: 15.09.2023).
4. Евтифьев М.Д., Лысенко Е.А. Автоматизация вибрационных испытаний элементов конструкции летательных аппаратов с применением нейронных сетей // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва. 2005. №3. С. 123-126.
5. Кокнаев Н.А., Фирсова С.А. Разработка комплекса программ автоматизации обработки результатов испытаний в лаборатории механических испытаний // Огарёв-online. 2019. №10. URL: <https://journal.mrsu.ru/arts/razrabotka-kompleksa-programm-avtomatizacii-obrabotki-rezultatov-isyitaniy-v-laboratorii-mexanicheskix-isyitaniy> (дата обращения: 15.09.2023).

### References

1. Roskosmos State Corporation. Launches. Available at: <https://www.roscosmos.ru/launch/2023> (accessed: 14.09.2023).
2. Roskosmos State Corporation. News. Roskosmos Enterprise will create more than 130 communication satellites «Marathon» in the interests of «Sphere» project. Available at: <https://www.roscosmos.ru/39698> (accessed: 14.09.2023).
3. ZETLAB. [Installation and power supply requirements for electrodynamic vibration systems]. Available at: <https://zetlab.com/podderzhka/vibratsionnyie-isyitaniya/provedenie-isyitaniy-suv/trebovaniya-k-montazhu-i-elektropitaniyu> (accessed: 15.09.2023)
4. Evtif'ev M.D., Lysenko E.A. *Avtomatizaciya vibracionnyh ispytaniy elementov konstrukcii letatel'nyh apparatov s primeneniem nejronnyh setej* [Automation of vibration tests of aircraft design elements using neural networks]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetnyova*. 2005, no. 3, p. 123-126 (In Russ.).
5. Koknaev N.A., Firsova S.A. *Razrabotka kompleksa programm avtomatizacii obrabotki rezul'tatov ispytaniy v laboratorii mekhanicheskix ispytaniy* [Development of a complex of programs for automation of test results in laboratory of mechanical tests]. *Ogaryov-online*. 2009, no. 10 (In Russ.) Available at: <https://journal.mrsu.ru/arts/razrabotka-kompleksa-programm-avtomatizacii-obrabotki-rezultatov-isyitaniy-v-laboratorii-mexanicheskix-isyitaniy> (accessed: 15.09.2023)

© Воронин М. Е., Матвиенко С. Е., Двирный В. В., 2023

УДК 678.7

## СОВРЕМЕННЫЕ КЛЕЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И ПРИБОРОВ

А. И. Вялов, М. П. Зайцева, А. С. Шестаков

Акционерное общество «Композит»  
Российская Федерация, 141070, Московская область г. Королёв, Пионерская, 4  
E-mail: okgk@kompozit-mv.ru

*Представлены отечественные однокомпонентные клеевые материалы, применяемые в производстве современной высокоинтегрированной электронной техники – в технологиях flip-chip и Underfill (UF)-процесса (капсулирование), поверхностного монтажа.*

*Ключевые слова: клей, компаунд, flip-chip, Underfill, печатная плата, кристалл, корпус, температура отверждения, капсулирование.*

## MODERN ADHESIVE MATERIALS FOR RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT AND DEVICES

A. I. Vyalov, M. P. Zaytseva, A. S. Shestakov

Joint-stock company "Composite", 141070,  
4, Pionerskaya, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation  
E-mail: okgk@kompozit-mv.ru

*Single-component adhesive materials used in the production of modern highly integrated electronic equipment are presented – in flip-chip and underfill (UF)-process (encapsulation), surface mounting technologies.*

*Keywords: adhesive, compound, flip-chip, Underfill, printed circuit board, crystal, case, curing temperature, encapsulation.*

С увеличением степени интеграции и уменьшения размеров компонентов в производстве радиоаппаратуры и радиоэлектронных устройств использование традиционных способов монтажа становится проблематичным и нерентабельным. На сегодняшний день широко применяется целый ряд современных технологий сборочно-монтажных работ с использованием новых типов клеевых материалов, позволяющих создавать сложные устройства, обеспечивать значительное повышение надежности и длительность работы аппаратуры, а также возможность автоматизации производственного процесса.

Для повышения механической прочности паяных соединений шариковых выводов при производстве современной электронной техники является капсулирование или Underfill (UF)-процесс, т. е. создание монолитной структуры для системы «микросхема – шарики припоя – контактные площадки – печатная плата (ПП)» путем заливки в пространство между микросхемой и платой клея-компаунда с высокой капиллярностью (рис. 1). Заливка компаундом позволяет повысить надежность радиоэлектронных устройств за счет реализации следующих факторов [1; 2]:

- нивелирование механических напряжений из-за различий в значениях коэффициентов теплового расширения подложки ПП, паяных соединений кристалла/корпуса компонента;
- повышение механической прочности паяных соединений благодаря защите от вибрационных, ударных нагрузок и от проникновения влаги под корпуса компонентов;
- исключение образования пузырей и пустот.

Отечественные однокомпонентные герметизирующие клеи-компаунды, аналогичные материалам серии Underfill (Канада, США, Япония, Германия), не представлены на рынке из-за отсутствия отечественных латентных отвердителей с малым временем отверждения. Поэтому для разработки данных

электроизоляционных клеев-компаундов в АО «Композит» был разработан целый ряд латентных отвердителей на основе кислот Льюиса с различными азотосодержащими соединениями, позволяющие проводить отверждение композиций при температурах от 90 °С в течение 15–30 мин.

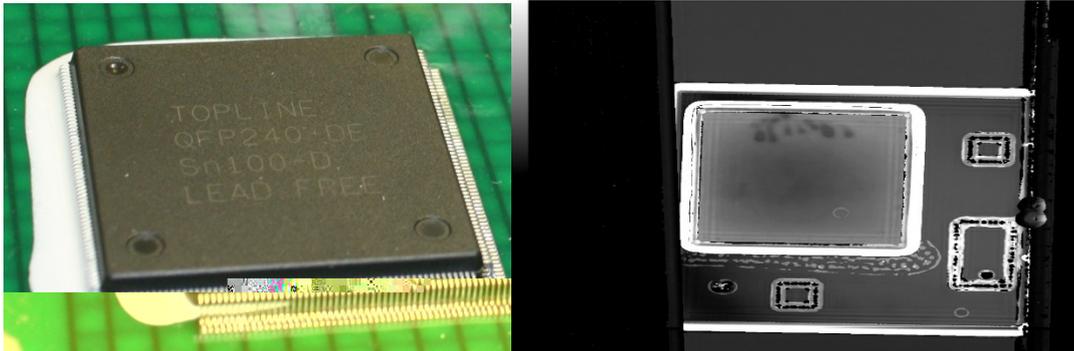


Рис. 1. Капсулирование подэлементного пространства под поверхностно-монтируемыми компонентами на ПП

На основе отверждающих систем дополнительно разработаны:

– конструкционный клей для использования в производстве высокоинтегрированной радиоэлектронной аппаратуры с целью сокращения технологического цикла изготовления электронных модулей с использованием технологии автоматического поверхностного монтажа (SMT – Surface Mount Technology) в парофазных или конвекционных печах, которая предполагает одновременную пайку предварительно установленных при помощи клеевого материала электрорадиоизделий (ЭРИ) на поверхность ПП при температуре 200 °С для свинец-содержащих припоев и 230 °С для припоев, не содержащих свинец, в течение нескольких минут [3–4];

– токопроводящие и теплопроводящие (диэлектрические) клеи, хорошо зарекомендовавшие себя в технологиях монтажа полупроводниковых кристаллов методом flip-chip [5].

#### Библиографические ссылки

1. Гераничев В.Н. Повышение надежности паяльных соединений в условиях термомеханического воздействия путем капсулирования матрицы шариковых выводов BGA корпусов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 1. С.61-67.
2. Смирнов А.М. Материалы Underfill. Эпизод II. Особенности нанесения // Поверхностный монтаж. 2009. № 1. С.24-26.
3. Lee N. C. Reflow soldering processes and troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip technologies. Berlington, USA, 2002.
4. Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. М.: ИД «Технологии», 2006.
5. Harmann, G. Wire bonding in microelectronics. N. Y.: McGraw Hill, 2010.

#### References

1. Geranichev V.N. [Povyshenie nadezhnosti payal'nykh soedinenii v usloviyakh termomekhanicheskogo vozdeistviya putem kapsulirovaniya matritsy sharikovykh vyvodov BGA korpusov]. Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki. 2009, no 1, p. 61-67.
2. Smirnov A.M. [Materialy Underfill. Epizod II. Osobennosti naneseniya]. Poverkhnostnyi montazh. 2009, no 1, p. 24-26.
3. Lee N. C. [Reflow soldering processes and troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip technologies]. Berlington, USA, 2002.
4. Dzhyud M., Brindli K. [Paika pri sborke elektronnykh modulei]. M.: ID «Tekhnologii», 2006.
5. Harmann, G. [Wire bonding in microelectronics]. N. Y.: McGraw Hill, 2010.

© Вялов А. И., Зайцева М. П., Шестаков А. С., 2023

УДК 681.586.2, 681.2.084

**О ПРИМЕНЕНИИ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА УЗЛА  
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

М. Н. Данилов<sup>\*</sup>, Т. В. Бурнышева

Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20  
<sup>\*</sup>E-mail: danilov-m-n@ya.ru

*Рассматривается технология создания цифрового двойника узла контроля усилия в элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций.*

*Ключевые слова: цифровой двойник, регулирование динамических систем, тензометрические датчики силы, крупногабаритные трансформируемые космические конструкции.*

**ON THE APPLICATION OF THE CONCEPT OF A DIGITAL TWIN OF A SPACECRAFT  
NODE IN APPLICATIONS OF CONTROL OF FORCES IN ELEMENTS  
OF LARGE-SIZED TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES**

M. N. Danilov<sup>1\*</sup>, T. V. Burnysheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University  
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
<sup>\*</sup>E-mail: danilov-m-n@ya.ru

*The technology for creating a digital twin of a force control node in elements of large-sized transformable space structures is considered.*

*Keywords: digital twin, regulation of dynamic systems, tensometric force sensors, large-sized transformable space structures.*

Одной из важнейших задач в проектировании крупногабаритных трансформируемых космических конструкций является задача обеспечения надежного их раскрытия и обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов в течение всего периода их эксплуатации [1]. Наземная отработка развертывания таких систем не в полной мере подтверждает работоспособность элементов конструкции в условиях невесомости и безвоздушного пространства. Поэтому актуальной задачей является синтез программно-аппаратных комплексов контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических систем, позволяющих реализовать автоматическое управление процессом раскрытия, а также осуществлять телеметрический контроль и управление с применением наземных систем объективного контроля. Это особенно актуально при проектировании антенн космических аппаратов с механически реконфигурируемой поверхностью рефлектора [2], позволяющих реализовать принципы регулирования динамических систем.

Тензометрические системы, включающие датчики сил и электронный блок аналого-цифрового преобразования сигналов датчиков [3], позволяет эффективно решить задачу контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций.

В настоящее время широкое применение в технике находят так называемые цифровые двойники объектов регулирования, представляющие собой вычислительную технологию имитационного моделирования объекта регулирования (некоторой реальной технической системы), характеризующуюся адекватностью прогнозов состояния моделируемой системы и минимальным отклонением расчетных значений параметров состояния этой системы от значений этих параметров, характерных для реаль-

ной системы, находящейся в том же состоянии что и виртуальная система. При этом, состояние виртуальной системы (цифрового двойника) приводится в соответствие состоянием реальной системы посредством процедуры периодической калибровки математических моделей, использующихся при имитационном моделировании, выполняемой на основе информации о состоянии реальной системы, собираемой с помощью систем сбора данных и датчиков, часто являющихся неотъемлемым элементом технологии цифрового двойника. В свою очередь, состояние реальной системы приводится к состоянию виртуальной системы посредством управляющих воздействий на реальную систему, выработка которых осуществляется на основе прогнозирования состояния регулируемой системы, а также информации, получаемой с помощью датчиков параметров состояния системы, и использования некоторой априорной информации о её состоянии. Организованная таким образом двунаправленная связь обеспечивает возможность осуществления регулирования и, вместе с тем, получения актуальной, достоверной и полной информации о текущем состоянии системы. Применение «тяжелых» систем автоматизации численного моделирования, в частности, конечноэлементных программных комплексов, позволяет в полной мере учесть особенности конкретного производства и технологии изготовления объекта практически любой технической сложности. Например, в работе [4] рассмотрена концепция цифрового двойника рефлектора антенны космического аппарата. А в работе [5] описана реализация технологии цифрового двойника при термомеханических испытаниях прецизионного углепластикового рефлектора антенной системы космического аппарата.

Цифровой двойник в настоящее время стал инструментом трансфера результатов фундаментальных научных исследований в производство, так как системы автоматизации численного моделирования, лежащие в основе концепции цифрового двойника, позволяют инженерам-конструкторам эффективно использовать результаты фундаментальных научных исследований, представленные полными физико-математическими моделями и современными вычислительными технологиями, при создании различных технически сложных изделий и их эксплуатации.

Целью работы является исследование вопросов применения концепции цифрового двойника узла космического аппарата в задачах контроля усилий в элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций.

Рассмотрена процедура создания цифрового двойника узла контроля усилия крупногабаритной трансформируемой космической конструкции, который снабжен тензометрическим датчиком силы. Основу цифрового двойника составляет геометрическая, математическая и конечноэлементная модели узла, включая упругий элемент датчика силы и составной преобразователь деформации упругого элемента в электрическое напряжение, пропорциональное величине усилия, созданные с использованием универсальной САЕ-системы. Решена задача идентификации параметров математических моделей. Описана процедура калибровки имитационной модели узла.

Сформулирована концепция цифрового двойника узла космического аппарата. Показано, что наличие цифрового двойника узла космического аппарата позволяет более эффективно осуществлять регулирование динамических систем, включающих данный узел. Обоснована применимость концепции цифрового двойника узла космического аппарата в задачах контроля усилий в элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций.

#### Библиографические ссылки

1. Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3, № 4. С. 200–208.
2. Першин А.С., Ляпин И.Ю., Данилов И.Ю., Бердникова Н.А. Зеркальные антенны космических аппаратов с механически реконфигурируемой поверхностью рефлектора // Научно-технические технологии. 2015. Т. 16, № 3. С. 23–26.
3. Бардаев П.П., Бурнышева Т.В., Данилов М.Н. Тензометрическая система контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // Решетневские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2022. С. 80–83.
4. Москвичев Е.В. Концепция цифрового двойника рефлектора антенны космического аппарата // Распределенные информационно-вычислительные ресурсы (DICR-2022) : сборник трудов XVIII Рос-

сийской конференции с международным участием. Под редакцией С.А. Рылова, Ю.И. Молородова, А.А. Жирнова, Ю.Н. Сиявского. Новосибирск, 2022. С. 186–189.

5. Иванов А.В. Реализация технологии «цифрового двойника» при термомодеформационных испытаниях прецизионного углепластикового рефлектора антенной системы космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 335–347. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-335-347.

### References

1. Taigin V.B., Lopatin A.V. [Method for ensuring high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. Space devices and technologies. 2019. V. 3. No. 4. P. 200–208. (In Russ.)

2. Pershin A.S., Lyapin I.Yu., Danilov I.Yu., Berdnikova N.A. [Mirror antennas of spacecraft with a mechanically reconfigurable reflector surface]. Science-intensive technologies. 2015. V. 16. No. 3. P. 23–26. (In Russ.)

3. Bardaev P.P., Burnysheva T.V., Danilov M.N. [Tensometric Measuring System for Control of Forces in Moving Elements of Large Transformable Space Structures]. Reshetnev readings: materials of the XXVI International scientific and practical conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems, academician M. F. Reshetnev. / Sib. state aerospace univ. Krasnoyarsk, 2022. P. 80–83. (In Russ.)

4. Moskvichev E.V. [The concept of a digital twin of a spacecraft antenna reflector]. Distributed information and computing resources (DICR-2022): collection of proceedings of the XVIII Russian conference with international participation. Edited by S.A. Rylova, Yu.I. Molorodova, A.A. Zhirnova, Yu.N. Sinyavsky. Novosibirsk, 2022. P. 186–189. (In Russ.)

5. Ivanov A. V. [Implementation of “digital twin” technology within the thermo-elastic distortion testing of a precision carbon fiber reflector for the spacecraft antenna subsystem]. Siberian Aerospace Journal. 2023, Vol. 24, No. 2, P. 335–347. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-335-347. (In Russ.)

© Данилов М. Н., Бурнышева Т. В., 2023

УДК 001.894; 629.7.018

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ТРИЗ ДЛЯ НЕСТАНДАРТНЫХ РЕШЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

В. В. Двирный<sup>1,2,3</sup>, А. А. Шевчук<sup>1,2\*</sup>, Г. В. Двирный<sup>2</sup>, Е. С. Сидорова<sup>3</sup>, С. Ю. Телешун<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

*Рассмотрены примеры решения нестандартных технических проблем в области наземной экспериментальной отработки космических аппаратов с использованием инструментов и методов теории решения изобретательских задач (ТРИЗ)*

*Ключевые слова: теория решения изобретательских задач, изобретение, наземная отработка космических аппаратов*

## APPLICATION OF TIPS TOOLS TO SOLVE NON-STANDARD TECHNICAL PROBLEMS

V. V. Dvirniy<sup>1,2</sup>, A. A. Shevchuk<sup>1,2</sup>, G. V. Dvirniy<sup>2</sup>, E. S. Sidorova<sup>3</sup>, S. Yu. Teleshun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Siberian Federal University

79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*We looked at some examples of solving non-standard technical problems in the field of ground-based experimental tests of spacecraft using tools and methods of the theory of inventive problem solving (TIPS)*

*Keywords: theory of inventive problem solving, invention, ground-based experimental tests of spacecraft*

Инженерам в своей профессиональной деятельности приходится решать самые разнообразные виды задач. Большая часть инженерных задач формализована, содержит четкую постановку и определенный метод решения. Другая часть задач отличается нетривиальностью и не имеет общих правил решения, требует нестандартного и творческого подхода.

Среди творческих задач особое место занимают изобретательские, ориентированные на создание новых, не имеющих аналогов продукции или технологий [1].

Значительно сократить время и упростить решение таких задач помогает теория решения изобретательских задач (ТРИЗ), созданная советским изобретателем Г.С. Альтшуллером и дополненная позже его учениками и последователями. Одной из предпосылок ТРИЗа является возможность строить изобретательские решения, опираясь на объективно существующие законы развития и функционирования технических систем. Основу ТРИЗа составляют 40 общих изобретательских приёмов и 76 стандартных шаблонов решений.

В качестве примера рассмотрим две изобретательские задачи, простое и эффективное решение которых было предложено работниками АО «РЕШЕТНЕВ» с использованием принципов ТРИЗ [2]:

- принцип «универсальности»: объект выполняет несколько разных функций, благодаря чему отпадает необходимость в других объектах.

При термовакуумных испытаниях космических аппаратов появилась необходимость защитить от перебоев электропитания систему жидкостного охлаждения вакуумно-откачного оборудования, состоящую, как правило, из холодильной машины (чиллера) с циркуляционными насосами, гидроаккумулятора, расширительного бака и замкнутого контура трубопроводов с циркулирующим в них жидким теплоносителем (рис. 1).

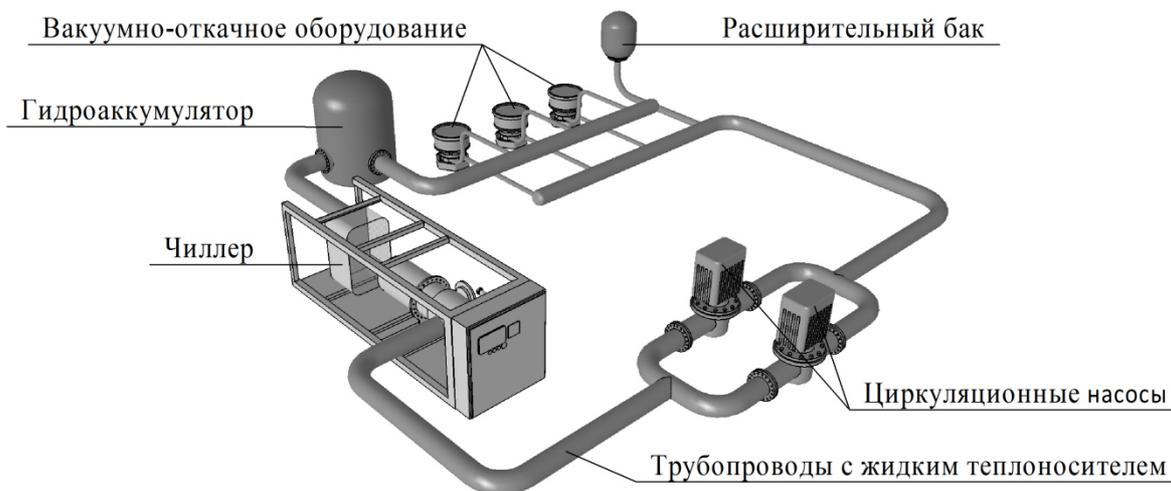


Рис. 1. Чиллерная система с замкнутым контуром жидкостного охлаждения

При решении проблемы «в лоб» для питания чиллера требуется специализированный, мощный и крайне дорогостоящий источник бесперебойного питания (ИБП). При перебоях электропитания ИБП, используя запасенную в аккумуляторах энергию, вырабатывает напряжение, необходимое для работы чиллера, который, в свою очередь, преобразует его в работу по охлаждению теплоносителя. КПД такого способа невысок.

Однако известно, что любой теплоноситель обладает тепловой инерцией, а значит, может выполнять еще одну функцию – аккумулятора холода. Используя принцип ТРИЗ, можно обойтись без чиллера и мощного ИБП, поддерживая заданное время в замкнутом контуре циркуляцию охлажденного ранее теплоносителя при условии его достаточной массы.

В предложенном и реализованном решении в цепи управления насосами введен дополнительный модуль, имитирующий при перебоях управляющие сигналы чиллера, а для питания насосов используют обычный, маломощный ИБП. Как показала многолетняя практика, такой способ не только прост и эффективен, но и обеспечивает большее время автономной работы системы охлаждения.

- принцип «наоборот»: перевернуть объект «вверх ногами», вывернуть его.

При термовакуумных испытаниях имитируют воздействие на космический аппарат холодных и горячих температур. Режимы холодных температур создают при помощи криогенных экранов – внутренних стенок термовакуумной камеры, охлаждаемых жидким азотом. Режимы горячих температур создают при помощи имитатора солнечного излучения (ИСИ), часть компонентов которого, коллимирующие зеркала или излучатель больших размеров, приходится размещать между криогенными экранами и объектом испытаний. Это приводит к увеличению времени достижения холодных температур на объекте испытаний или требует сложных и дорогостоящих решений, таких, как цельнометаллические коллимирующие зеркала с внутренней рубашкой, охлаждаемой жидким азотом.

Предложенное с использованием принципа ТРИЗ «наоборот» решение заключается в размещении криогенного экрана не за ИСИ, а между ним и объектом испытаний. При этом криогенный экран выполняют не сплошным, а в виде решетки с высокими поглощающими свойствами, боковые стенки ячеек которой параллельны потоку излучения ИСИ.

В режиме горячих температур излучение ИСИ, обладающее высокой направленностью, с малыми потерями проходит через решетку на объект испытаний, а благодаря высокой поглощательной способности стенок решетки происходит дополнительное спрямление излишне расходящихся лучей. Наоборот, в режиме холодных температур и неработающем ИСИ тепловое излучение объекта испыта-

ний, имеющее исключительно диффузный характер, большей частью поглощается стенками охлаждающей решетки.

Предложенные решения защищены патентами РФ [3; 4].

### Библиографические ссылки

1. Гольдштейн Е.И. Теория решения изобретательских задач: учебное пособие / Е.И. Гольдштейн, П.Ф. Коробко. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 153 с.
2. ТРИЗ интернет-школа. Приемы (принципы) устранения системных (технических) противоречий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.triz.natm.ru/instrum/40priem.htm> (дата обращения 10.09.2023)
3. Пат. 2698148 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F28B 9/00; F25B 41/00; G06F 1/20. Способ бесперебойного охлаждения в чиллерных системах с замкнутым контуром жидкостного охлаждения / А.А. Шевчук ; заявитель и патентообладатель акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева». № 2018128994 ; заявл. 07.08.18 ; опубл. 22.08.19.
4. Пат. 2801979 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B64G 7/00. Способ моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов в термовакуумной камере / О.В. Пастушенко, А.А. Шевчук, В.В. Двирный ; заявитель и патентообладатель акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева». № 2023104414 ; заявл. 28.02.23 ; опубл. 13.07.23, бюлл. № 20.

### References

1. Goldshteyn E. I., Korobko P. F. *Teoriya resheniya izobretatelskikh zadach: uchebnoye posobiye* [Theory of inventive problem solving: a textbook]. Tomsk, 2009, 153 p. (In Russ.).
2. *TRIZ internet-shkola. Priyemy (printsipy) ustraneniya sistemnykh (tekhnicheskikh) protivorechiy* [TRIZ online school. Techniques (principles) for eliminating systemic (technical) contradictions]. URL: <http://www.triz.natm.ru/instrum/40priem.htm> (accessed: 10.09.2023).
3. Shevchuk A. A. *Sposob bespereboynogo okhlazhdeniya v chillernykh sistemakh s zamknutym konturom zhidkostnogo okhlazhdeniya* [Method to ensure uninterrupted cooling in chiller systems with closed liquid cooling loop]. Patent RF, no. 2698148, 2018.
4. Pastushenko O. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V. *Sposob modelirovaniya usloviy vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov v termovakuumnoy kamere* [Method for simulating the conditions of external heat exchange of spacecraft in a thermal vacuum chamber]. Patent RF, no. 2801979, 2023.

© Двирный В. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., Сидорова Е. С., Телешун С. Ю., 2023

УДК 629.8:531.395

## О ПРИМЕНЕНИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ РАСКРЫТИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. Зимин\*, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1  
\*E-mail: zimin@bmstu.ru

*Предлагается в качестве активного элемента термомеханического привода применить проволоку, изготовленную из материала никелида титана. Предварительные комплексные испытания таких активных элементов подтвердили принципиальную возможность создания термомеханического привода для раскрытия трансформируемых космических конструкций.*

*Ключевые слова: трансформируемая космическая конструкция, активный элемент, эффект памяти формы*

## ABOUT THE APPLICATION OF A THERMOMECHANICAL ACTUATOR FOR THE DEPLOYMENT OF TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES

V. N. Zimin\*, A.V. Krylov, V. S. Filippov, A. O. Shakhverdov

Bauman Moscow State Technical University  
building 1, 5, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation  
\*E-mail: zimin@bmstu.ru

*It is proposed to use a wire made of titanium nickelide material as an active element of a thermomechanical actuator. Preliminary comprehensive tests of such active elements have confirmed the fundamental possibility of creating a thermomechanical actuator for the deployment of transformable space structures.*

*Keywords: transformable space structure, active element, shape memory effect*

В течение последних лет материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) находят все более широкое применение в аэрокосмической технике. Для крупногабаритных трансформируемых космических конструкций [1] материал с ЭПФ наиболее целесообразно использовать как рабочее тело термомеханических приводов, раскрывающих их в условиях открытого космоса – невесомости [2]. Наиболее ярко ЭПФ выражен в материале никелида титана. Данный материал из-за своих физико-механических свойств нашел удачное применение на практике, в том числе в термомеханических приводах. Такой привод может быть выполнен в форме проволоки, пружины или ленты [3–5]. Проволоку из материала никелида титана предлагается использовать в качестве активного элемента для создания термомеханического привода. В результате предварительных экспериментальных исследований было установлено, что термомеханический привод с проволочным активным элементом, выполненным из материала никелида титана, обладающего ЭПФ, имеет преимущества, заключающиеся в генерации значительных усилий, малой массе и низкой потребляемой мощности. В тоже время термомеханический привод обладает малой величиной полезного перемещения.

Обеспечение больших перемещений активными элементами термомеханического привода с ЭПФ требует значительных линейных размеров проволоки, выполненной из материала никелида титана. Этот недостаток можно преодолеть за счет укладки длинного проволочного активного элемента в составных звеньях трансформируемой космической конструкции. Техническое решение данной проблемы возможно за счет огибания шарнирного узла, связывающего составные звенья раскрывающихся частей конструкции, активным проволочным элементом. Для оценки технических решений данной проблемы были проведены следующие экспериментальные исследования (рис. 1).



*a*



*б*



*в*

Рис. 1. Экспериментальные установки по определению рабочего хода проволочного активного элемента:

*a* – эксперимент с цилиндрической оправкой; *б* – эксперимент с фторопластовым диском; *в* – эксперимент с фторопластовым диском и закрепленным грузом

Проволочные активные элементы диаметром 1,5 мм из материала никелида титана с ЭПФ, предварительно подвергались различным видам температурной обработки. Термообработка проводилась с целью устранения возможных внутренних напряжений. Начальная длина проволочных активных элементов после температурной обработки составила 389 мм, 436.6 мм, 438.3 мм и 436.8 мм. Далее к активным элементам прикладывалось усилие, которое создавало в них растягивающее напряжение. После снятия нагрузки длина активных элементов составила 420 мм, 472.2 мм, 473.7 мм и 471.8 мм. Далее активный элемент длиной 420 мм был намотан в 3 витка на цилиндрическую оправку диаметром 38 мм, неподвижно закрепленную на экспериментальном стенде. Один конец активного элемента также неподвижно был закреплен относительно стенда, а другой – подсоединен к датчику перемещений. Затем активный элемент нагревался путем пропускания через него электрического тока. При нагреве перемещение свободного конца активного элемента составило 14.6 мм, это 3,5% от рабочей длины 420 мм. Перемещение активного элемента без намотки на цилиндрическую оправку – 5% от 420 мм. Несмотря на уменьшение рабочего хода активного элемента, связанное с наличием трения между проволокой и оправкой, его длина в направлении срабатывания уменьшается более чем в 5 раз. Активный элемент длиной 472.2 мм был уложен в канавку на внешней поверхности диска из фторопласта на оборот с четвертью. Одним концом проволочный активный элемент был закреплен неподвижно относительно экспериментальной установки, а другим прикреплен к диску, который мог вращаться вокруг своей оси. Диаметр фторопластового диска 130 мм. В данном испытании уменьшение длины активного элемента составило 23.6 мм, это 5% от рабочей длины 472.2 мм.

Активный элемент длиной 473.7 мм был размещен на фторопластовом диске диаметром 130 мм. К диску был закреплен груз весом 7.3 кг. Расстояние точки крепления груза от оси вращения диска 65 мм. Таким образом, в процессе нагрева на активный элемент действовал момент величиной 4.7 Н·м. Уменьшение длины активного элемента составило при испытаниях 19.7 мм, это 4.2% от его рабочей длины 473.7 мм.

Активный элемент длиной 471.8 мм в процессе проведения экспериментальных исследований располагался вертикально без размещения его на цилиндрической оправке и фторопластовом диске. Уменьшение длины активного элемента в процессе испытаний составило 24.6 мм, это 5.2% от рабочей длины 471.8 мм.

Результаты проведенных испытаний показали, что рабочий ход проволочного активного элемента различается не столь существенно. Однако габариты термомеханического привода можно значитель-

но уменьшить. Испытания подтвердили принципиальную возможность создания термомеханического привода раскрытия для космических трансформируемых конструкций с использованием проволочного активного элемента из материала никелида титана с ЭПФ. Дополнительно испытания продемонстрировали также возможность использования одного термомеханического привода для раскрытия многосекционной трансформируемой космической конструкции.

### Библиографические ссылки

1. Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Часть 1) // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2007, № 2. С. 51-57.
2. Likhachev, V. A., Razov, A. I., Cherniavsky, A. G., Kravchenko, Y., & Trusov, S. N. (1994, March). Truss mounting in space by shape memory alloys. In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA (pp. 245-248).
3. Schiedeck, F., Hensel, T., & Wallaschek, J. (2006). The use of shape memory alloy wires in actuators. In Solid State Phenomena (Vol. 113, pp. 195-198). Trans Tech Publications Ltd.
4. Liang C., Rogers C.A. Design of memory alloy Actuators // Journal of intelligent material systems and structures, 1997. Vol 8. Pp. 303-313.
5. Riad A, Ainamany A and Benzohra M 2017 The shape memory alloy actuator controlled by the Sun's radiation *Materials Research Express* vol 4 7 075701.

### References

- 1 Lopatin, A. V., & Rutkovskaya, M. A. (2007). The review of designs of modern transformed space antennas (Part 1). Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika MF Reshetneva (Vestnik SibGAU). (2). 51-57.
- 2 Likhachev, V. A., Razov, A. I., Cherniavsky, A. G., Kravchenko, Y., & Trusov, S. N. (1994, March). Truss mounting in space by shape memory alloys. In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA (pp. 245-248).
- 3 Schiedeck, F., Hensel, T., & Wallaschek, J. (2006). The use of shape memory alloy wires in actuators. In Solid State Phenomena (Vol. 113, pp. 195-198). Trans Tech Publications Ltd.
- 4 Liang C., Rogers C.A. Design of memory alloy Actuators // Journal of intelligent material systems and structures, 1997. Vol 8. Pp. 303-313.
- 5 Riad A, Ainamany A and Benzohra M 2017 The shape memory alloy actuator controlled by the Sun's radiation *Materials Research Express* vol 4 7 075701.

© Зимин В. Н., Крылов А. В., Филиппов А. О., Шахвердов А. О., 2023

УДК 629.78

## СОЗДАНИЕ ПРИВОДА ДЛЯ РАСКРЫВАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

В. Н. Зимин\*, Н. Г. Павлов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1  
\*E-mail: zimin@bmstu.ru

*Разработан силовой привод на базе сплава никелида титана, обладающего эффектом памяти формы. Получены данные о работоспособности, крутящем моменте, амплитуде перемещения и долговечности привода, определены условия термосиловой подготовки.*

*Ключевые слова: трансформируемые космические конструкции, эффект памяти формы, приводы, экспериментальные исследования.*

## DEVELOPMENT OF AN ACTUATOR FOR DEPLOYMENT OF TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES WHICH IS MADE OF MATERIAL WITH A SHAPE MEMORY EFFECT

V. N. Zimin\*, N. G. Pavlov

Bauman Moscow State Technical University  
building 1, 5, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation  
\*E-mail: zimin@bmstu.ru

*A force actuator based on the nickel-titanium alloy with shape memory effect has been developed. Data on performance, torque, displacement amplitude, and actuator durability have been obtained, and the conditions for thermo-mechanical training have been determined.*

*Keywords: transformable space structures, shape memory effect, actuators, experimental investigations.*

С развитием космической отрасли стало ясно, что спутники формата CubeSat представляют собой не только экономически эффективное решение, но и платформу для сложных космических миссий. Эти микроспутники, не смотря на свою компактность, могут нести значительные научные и технологические нагрузки. Однако их эффективность часто ограничена отсутствием крупногабаритных развертываемых конструкций, что акцентирует внимание на необходимости разработки новых приводных систем [1, 2].

Материалы с эффектом памяти формы представляют особый интерес для космической промышленности. Их способность изменять форму в ответ на внешние стимулы, такие как изменение температуры, делает их хорошими кандидатами для разработки приводов [3]. В частности, никелид титана, благодаря своим уникальным свойствам, демонстрирует обширные перспективы применения в этой области [4, 5].

В работе представлен разработанный привод для раскрытия крупногабаритных космических конструкций. Актуатором в данном приводе является проволока из никелида титана марки ТН-1, работающая в осевом направлении. Под воздействием температуры начинаются обратные мартенситные превращения, приводя проволоку в движение и возвращая ей первоначальную форму. Усилие передается на барабан с тросом/нитью и далее непосредственно на раскрываемую конструкцию. Такой подход обеспечивает минималистичную конструкцию, что существенно для ограниченного пространства и массы малого космического аппарата, а также плавность хода, что снижает ударные нагрузки при раскрытии крупногабаритных конструкций.

Для практической оценки работы прототипа привода была организована экспериментальная установка. Через ряд испытаний были собраны данные о работоспособности, крутящем моменте, амплитуде перемещения и долговечности привода.

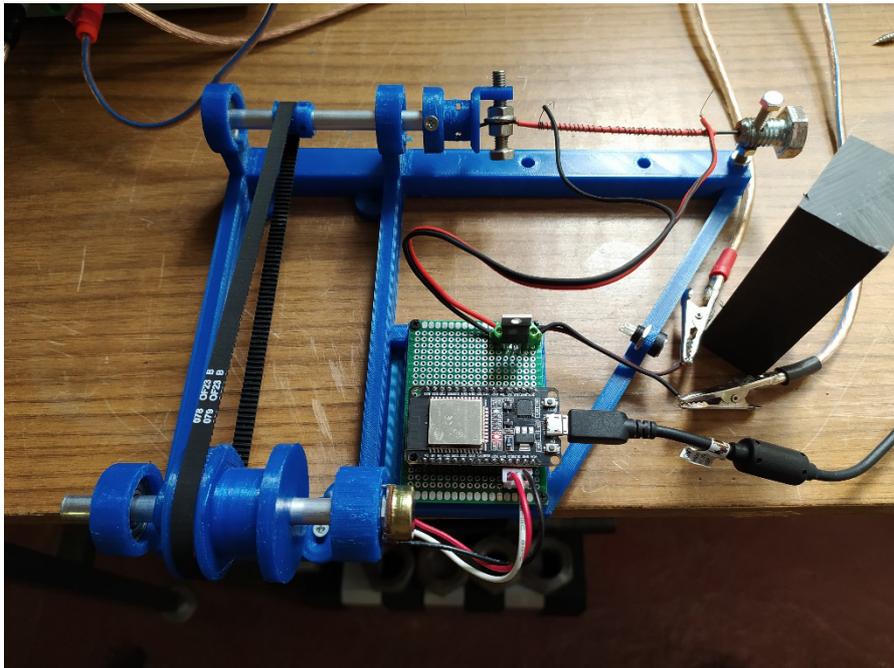


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования проволоки из материалов с эффектом памяти формы

Аналогичный модернизированный привод был интегрирован в конструкцию раскрываемой штанги магнитометра спутника формата CubeSat 3U. Габариты системы в сложенном состоянии – 0,3U, длина развернутой штанги – 325 мм. Работоспособность была подтверждена компьютерным моделированием и наземными испытаниями.



Рис. 2. Моделирование раскрытия штанги магнитометра

Работа с приводами на основе никелида титана показала значительный потенциал их применения в конструкциях CubeSat-систем. Эти приводы могут предложить решения для текущих ограничений в развертываемых конструкциях микроспутников, показывая, при определенных условиях, до 100% восстановления деформации. В дальнейшем, с учетом дополнительных исследований и оптимизации, эта технология может значительно расширить возможности спутников формата CubeSat, делая их еще более адаптивными к различным космическим миссиям.

### Библиографические ссылки

1. Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Часть 1) // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2007. № 2. С. 51-57.
2. Механика больших космических конструкций / Н.В. Баничук, Карпов И.И., Д.М. Климов и др. М.: Изд-во «Факториал», 1997. 302 с.
3. Likhachev, V.A., Razov, A. I., Cherniavsky, A. G., Kravchenko, Y., Trusov, S. N. (1994, March). Truss mounting in space by shape memory alloys. In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA (pp. 245-248).
4. Liang, C., & Rogers, C. A. (1997). Design of shape memory alloy actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 8(4), 303-313.
5. Li, J., Zhong, G., Yin, H., He, M., Tan, Y., & Li, Z. (2017, May). Position control of a robot finger with variable stiffness actuated by shape memory alloy. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4941-4946). IEEE.

### References

1. Lopatin, A. V., & Rutkovskaya, M. A. (2007). The review of designs of modern transformed space antennas (Part 1). *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika MF Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, (2), 51-57.
2. Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M. and others. *Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstrukt-siy [Mechanics of large space structures]*. Moscow, Faktorial Publ., 1997, 302 p.
3. Likhachev, V.A., Razov, A. I., Cherniavsky, A. G., Kravchenko, Y., Trusov, S. N. (1994, March). Truss mounting in space by shape memory alloys. In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA (pp. 245-248).
4. Liang, C., & Rogers, C. A. (1997). Design of shape memory alloy actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 8(4), 303-313.
5. Li, J., Zhong, G., Yin, H., He, M., Tan, Y., & Li, Z. (2017, May). Position control of a robot finger with variable stiffness actuated by shape memory alloy. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4941-4946). IEEE.

УДК 629.78

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

И. И. Зимин<sup>1</sup>, С. И. Меркулов<sup>1,2\*</sup>, М. А. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
\*E-mail: merkulovsi@iss-reshetnev.ru

*Исследуются перспективы разработки малых космических аппаратов многоспутниковых орбитальных группировок. Рассматриваются особенности проектирования малого космического аппарата микро-класса под серийное производство.*

*Ключевые слова: малый космический аппарат, многоспутниковая орбитальная группировка, серийное производство, модуль, передача данных.*

## FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF THE SMALL SPACECRAFT TO ENTURE MASS PRODUCTION

I. I. Zimin<sup>1</sup>, S. I. Merkulov<sup>1,2\*</sup>, M. A. Smirnov<sup>1,2</sup>

1Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodniy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*E-mail: merkulovsi@iss-reshetnev.ru

*The article talks about the prospects of small spacecraft of multi-satellite orbital constellations and include consideration of features of development of the small multi-ciass spacecraft for mass production.*

*Keywords: small spacecraft, multi-satellite orbital constellation, mass production, module, data transfer.*

В настоящее время происходит активное развитие малых космических аппаратов (МКА). По сравнению космическими аппаратами среднего и тяжелого классов МКА имеют ряд преимуществ, например, относительно короткий период разработки, сравнительно более низкую стоимость производства и выведения на орбиту функционирования. Малая масса и габариты позволяют за один запуск выводить на орбиту сразу группу таких аппаратов. МКА находят применение в народно-хозяйственной и коммерческих областях, они решают задачи спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли, проведения научных исследований, экспериментов, отработки перспективных технологий и т. д. АО «РЕШЕТНЕВ» активно развивает направление создания малых космических аппаратов, применяя передовые технологии и подходы к разработке [1].

Одним из таких аппаратов является МКА «Марафон». Это космический аппарат передачи данных микро-класса. Его целевой задачей, в соответствии с назначением многоспутниковой системы передачи данных «Марафон IoT», является обеспечение, в составе орбитальной группировки (ОГ), прямого информационного контакта с абонентскими средствами потребления для предоставления услуг по передаче данных сервисов «интернет вещей» (IoT). Для обеспечения обслуживания глобальной рабочей зоны, ОГ в полном составе должна состоять из 264 МКА, функционирующих на высоте 750 км на двенадцати равноразнесенных приполярных орбитальных плоскостях [2].

Общий вид МКА «Марафон» представлен на рис. 1. Полезная нагрузка (ПН) МКА включает в себя антенно-фидерную систему, а также следующие модули с обработкой и регенерацией информации на

борту: модуль фидерной радиолинии (ФР), обеспечивающий прием управляющих команд и передачу телеметрии; модуль IoT ISM, обеспечивающий передачу данных на абонентские средства связи, не требующие времени реакции, близкого к реальному; модуль IoT S для сервисов «реального времени», требующих времени реакции не более 20 мс и модуль автоматического независимого наблюдения-вещания (АЗН-В), предназначенный для приема аналоговых сигналов АЗН-В, поступающих от антенно-фидерных устройств, аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки принятых сигналов, детектирования и демодуляции сообщений АЗН-В и передачи пакетов сообщений в модуль ФР [3].

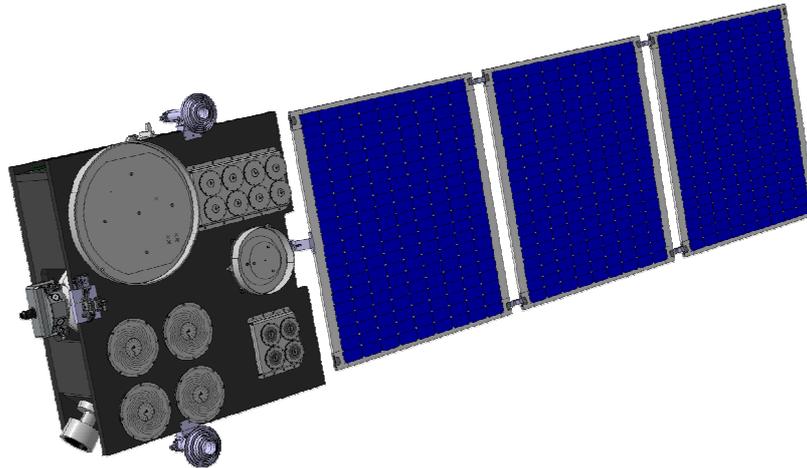


Рис. 1. Общий вид экспериментального образца КА «Марафон»

При проектировании МКА «Марафон» в него был заложен принцип модульного построения, заключающийся в делении КА на конструктивно-технологические модули. Такой подход был выбран в целях обеспечения возможности поточного серийного производства КА. Конструктивно-технологический модуль представляет собой подборку, состоящую из приборов и бортовой аппаратуры (БА), и имеет четко определенные интерфейсы. Деление на такие модули обеспечивает последовательно-параллельную схему изготовления и сборки составных частей (блоков, модулей) с последующей их интеграцией [4-5].

МКА «Марафон» является перспективной разработкой, заключающей в себе современные достижения науки и техники. Создание МКА «Марафон» основывалось на принципах унификации элементов и интерфейсов, автоматизации применения технических решений для возможности автоматизированного изготовления, а также цифровизации среды производства.

#### Библиографические ссылки

1. Зимин И.И., Валов М.В., Кириллов В.А., Попов В.В. Перспективы развития малых космических аппаратов АО «ИСС» // Научно-технические вестники ИСЗ РАН. № 12, т.19 М: Радиотехника, 2018. С. 48–56
2. Чеботарев В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учебное пособие / В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко ; Сиб. Гос. Аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с. ил.
3. А.Н. Кирилин, Г.П. Аншаков, Р.Н. Ахметов и др. Космическое аппаратостроение. Научно-технические исследования и практические разработки АО «РКЦ «Прогресс» / Под ред. д.т.н. А.Н. Кирилина. Самара: 2017. 376 с.: илл.
4. Методические принципы формирования ряда унифицированных космических платформ спутников связи / В. Е. Чеботарев, И. И. Зимин, А. А. Внуков, Е. А. Шангина // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3. С. 508–519. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-508-519
5. И.И. Зимин, М.В. Валов, В.Е. Чеботарев. Принципы субмодульного построения унифицированной космической платформы для малых космических аппаратов // Сборник тезисов IV Научно-

технической конференции молодых специалистов АО «ИСС» «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» Железногорск, 2017. С. 33-34

### References

1. Zimin I.I., Valov M.V., Kirillov V.A., Popov V.V. *Perspektivy razvitiya malykh kosmicheskikh apparatov AO "ISS"* [Prospects for the development of small spacecraft JSC "ISS"] *Naukoyomkiyeologii* No. 12, t.19 Moscow: Radio engineering, 2018. pp. 48-56
2. Chebotaryev V.E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing spacecraft for information support: Tutorial] V.E. Chebotaryev, V.E. Kosenko ; Siberian State Aerospace University. Krasnoyarsk, 2011. 488 p., [24] with ill. (In Russ.)
3. A.N. Kirilin, G.P. Anshakov, R.N. Achmetov and etc. *Kosmicheskoye apparatostroyeniye. Nauchno-tekhnicheskiye issledovaniya i prakticheskiye razrabotki AO "RKC "Progress" "* [Space engineering. Scientific and technical research and practical development of JSC "RSC Progress"] Edited by a.p.t.s. A.N. Kirilin. Samara: 2017. 376 p.: ill. (In Russ.)
4. V.E. Chebotaryev, I.I. Zimin, A.A. Vnukov, E.A. Shangina. *Metodicheskiye principy formirovaniya ryada unifikirovannikh kosmicheskikh platform sputnikov svyazi* [Methodological principles for the formation of a number of unified space platforms of communication satellites] *Sibirskiy aerokosmicheskij zhurnal*. 2022. T. 23, № 3 pp. 508-519. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-508-519 (In Russ.)
5. I.I. Zimin, M.V. Valov, V.E Chebotaryev. *Principy submodulnogo postroyeniya unifikirovannoy kosmicheskoy platform dlya malikh kosmicheskikh apparatov* [Principles of submodular construction of a unified space platform for small spacecraft] *Sbornik tezisov IV Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov AO "ISS" "Razrabotka, proizvodstvo, ispytaniya i ekspluatatsiya kosmicheskikh apparatov i sistem"* Zheleznogorsk, 2017. pp. 33-34 (In Russ.)

© Зимин И. И., Меркулов С. И., Смирнов М. А., 2023

УДК 621.311.243

**КОНЦЕНТРАТОРНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ  
ИЗ ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА УГЛЕПЛАСТИКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ  
ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

В. С. Калиновский<sup>1</sup>, Е. И. Теруков<sup>1</sup>, Е. В. Контрош<sup>1\*</sup>, К. К. Прудченко<sup>1</sup>,  
И. А. Толкачев<sup>1</sup>, В. И. Кузоро<sup>2</sup>, В. И. Халиманович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Российская Федерация, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\* E-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

*Изготовлен и исследован космический фотоэлектрический модуль, включающий гибридный солнечный элемент на основе InGaP/Ga(In)As/Ge электрогенерирующих линеек, смонтированных на теплоотводящее основание из  $\alpha$ -Si:H/c-Si HJT солнечного элемента, и сдвоенную линейную линзу Френеля. Модуль сформирован на углепластиковом псевдосотовом несущем каркасе. Оптическая система обеспечивает при нулевой разориентации электрические мощности до  $400 \text{ Вт/м}^2$  электрогенерирующими линейками и до  $20 \text{ Вт/м}^2$  фотоактивным HJT Si теплоотводящим основанием. При разориентации модуля вдоль и поперёк фокуса линейного концентратора на  $\pm 24^\circ$  электрическая мощность снижается соответственно до  $\sim 0,9$  и  $0,6$  от максимального значения.*

*Ключевые слова: космический фотоэлектрический модуль, гибридный солнечный элемент, линейные линзы Френеля, углепластиковый псевдосотовый несущий каркас, HJT Si теплоотводящее основание.*

**CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULE OF HYBRID SOLAR CELLS  
ON A CARBON FRAME FOR SOLAR BATTERY OF SPACECRAFT**

V. S. Kalinovskii<sup>1\*</sup>, E. I. Terukov, E. V. Kontrosh<sup>1</sup>, K. K. Prudchenko<sup>1</sup>,  
I. A. Tolkachev<sup>1</sup>, V. I. Kuzoro<sup>2</sup>, V. I. Khalimanovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

26, Politekhnikeskaya str., St-Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\* E-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

*A space photovoltaic module including a hybrid solar cell based on InGaP/Ga(In)As/Ge electro-generating lines mounted on a heat sink base of  $\alpha$ -Si:H/c-Si HJT solar cell and double linear Fresnel lens has been fabricated and investigated. The module is formed on a carbon fiber pseudo-cell support frame. The optical system provides output electrical powers up to  $400 \text{ W/m}^2$  the electro-generating lines and up to  $20 \text{ W/m}^2$  the photoactive HJT Si heat sink base at zero misorientation. When the module is disorientated by  $\pm 24^\circ$  along and across the focus of the linear concentrator the output power is reduced up to  $\sim 0.9$  and  $0.6$  of the maximum value, respectively.*

*Keywords: space photovoltaic module, hybrid solar cell, linear Fresnel lenses, carbon fiber pseudo-cell support frame, HJT Si heat sink base plate*

Введение. Увеличение энергообеспечения бортовых систем космических аппаратов, требует создание более эффективных солнечных батарей (СБ) нового поколения, имеющих высокую энергопроизводительность, длительный более 20 лет срок активного существования, улучшенные массогаба-

ритные и стоимостные характеристики. Одним из перспективных путей решения достижения таких характеристик является разработка высокоэффективных космических солнечных батарей на основе концентраторных фотоэлектрических модулей с гибридными солнечными элементами (ГСЭ), линейными линзами Френеля на углепластиковой несущей конструкции [1-4].

Эксперимент и обсуждение результатов. В работе представлены результаты исследования характеристик фотоэлектрического модуля с гибридным солнечным элементом из InGaP/Ga(In)As/Ge электрогенерирующих линеек (ЭЛ) смонтированных на фотоактивное теплоотводящее основание (ТО) на основе гетероструктурного (НЛТ)  $\alpha$ -Si:H/c-Si солнечного элемента (СЭ), и двоянным линейным линзовым концентратором (ЛК) (Рис1а).

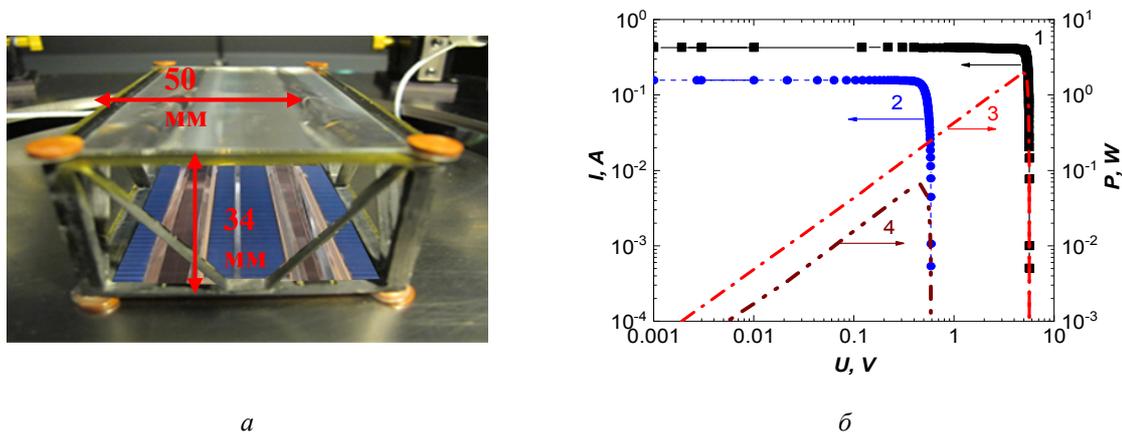


Рис. 1. Фотоэлектрический модуль на основе ГСЭ-ЛК и углепластиковой несущей конструкции (а); нагрузочные вольт-амперные (б) (кривые 1-2) и вольт-ваттные (кривые 3-4) характеристики при нулевой разориентации: последовательно соединенных ЭЛЛ с  $\alpha$ -Si:H/c-Si НЛТ ТО (кривые 1, 3) и НЛТ ТО (кривые 2, 4) измеренные на имитаторе солнечного излучения (АМ0; 1367 Вт/м<sup>2</sup>)

Фотоэлектрическая часть модуля размещена на углепластиковой псевдосотовой несущей конструкции (рис. 1, а). Рассматриваемый модуль – это основа для мультиплицирования при создании концентраторных космических солнечных батарей космических аппаратов, (рис. 3).

Измерения фотоэлектрических характеристик модуля выполнены при комнатной температуре на импульсном имитаторе коллимированного солнечного излучения спектра АМ0, 1367Вт/м<sup>2</sup>. Оптическая эффективность используемых двоянных линейных линзовых концентраторов типа линз Френеля с оптической площадью каждой 25 см<sup>2</sup> составляла  $\geq 90\%$  при освещении СИ, (АМ0, 1367Вт/м<sup>2</sup>) [1]. Модуль при нулевой разориентации обеспечивает на выходе одновременно удельную электрическую мощность при последовательном включении ЭЛЛ  $\sim 400$  Вт/м<sup>2</sup> и до 20 Вт/м<sup>2</sup> от фотоактивного кремниевое НЛТ ТО.

Разориентационные характеристики оптической системы ГСЭ-ЛК (модуля) измерялись с помощью моторизованного поворотного столика (рис. 2, а) с угловым разрешением 54 угловых секунды. Измерения фотоэлектрических параметров фиксировались при минимальном угле поворота 1 угловой градус. Экспериментальные разориентационные кривые представлены на рис. 2, б. Видно, что электрическая мощность на выходе оптической схемы (модуля) сохраняется при углах разориентации  $\pm 25$  угловых градусов в двух ортогональных направлениях относительно линии фокуса (рис.1, б, рис. 2, б).

На основе элементарного фотоэлектрического модуля разработаны углепластиковые несущие конструкции концевой панели и полномасштабного крыла СБ (рис. 3). Несущие конструкции созданы таким образом, чтобы при минимальных весовых характеристиках обеспечивать оптимальное плоскопараллельное размещение линзовых концентраторов и солнечных элементов, ослабляя влияние на них механических нагрузок несущего корпуса при термоциклировании и вибрациях.

Особенность разработанной конструкции, заключается в использовании полноразмерного двоянного линзового блока и гибридного СЭ, равных между собой по размерам и в тоже время, независимых элементов всей конструкции, с передачей им части механических и защитных функций [5]. Деградация КПД при облучении 1 МэВ электронами флюенсом  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>2</sup> для InGaP/Ga(In)As/Ge ЭЛЛ в модуле составила 10 %, а для НЛТ СЭ вне модуля с 19,2% до 13,6% [6].

Учитывая, что сегодня основной вклад в удельную стоимость планарных СБ вносят InGaP/Ga(In)As/Ge СЭ, то экономическая эффективность концентраторной солнечной батареи по сравнению с планарной СБ обеспечит снижение удельной стоимости концентраторной СБ не менее чем в 2 раза.

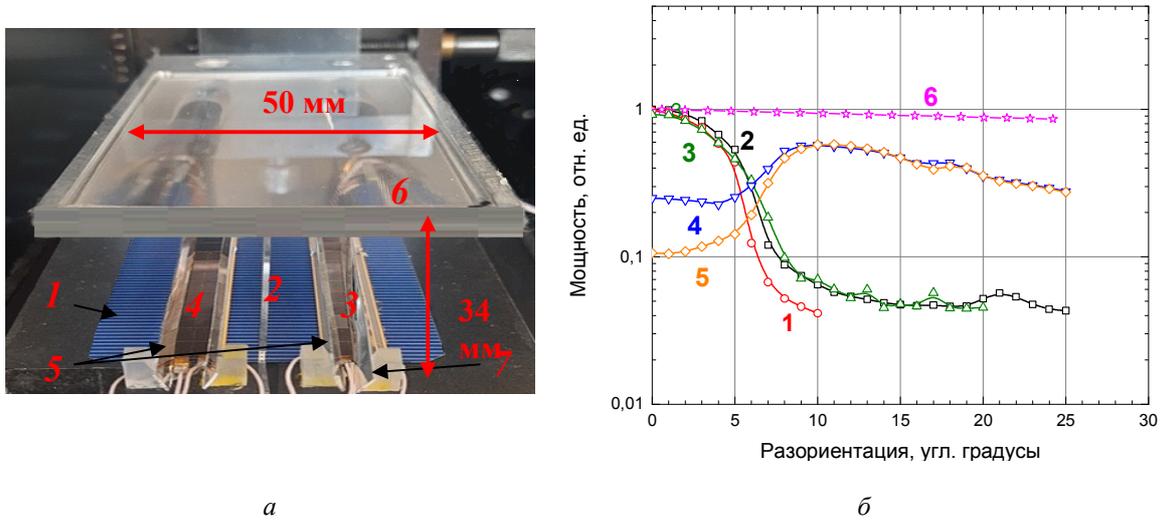


Рис. 2. Оптическая схема (модуль) на основе линзового концентратора Френеля, боковых отражателей и ГСЭ (а): 1 – ГСЭ из электрогенерирующих линеек (ЭГЛ) двух типоразмеров и (2) – фотоактивное теплопроводящее основание на основе  $\alpha$ -Si:H/c-Si HJT СЭ; 3 – ЭГЛ1 с СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge  $0,34\text{см} \times 1,6\text{см} \times 0,05\text{см}$ ; 4 – ЭГЛ2 с СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge  $0,5\text{см} \times 0,6\text{см} \times 0,1\text{см}$ ; 5 – боковые отражатели; 6 – двоянный линейный линзовый концентратор; 7 – электрические выводы; разориентационные характеристики (б) оптической схемы (субмодуля) поперёк (1-5) и вдоль линии оптического фокуса (6): 1 – ЭЛГ включены последовательно; 2 – ЭГЛ и HJT включены последовательно; 3 – ЭЛГ включены параллельно; 4 – ЭГЛ и HJT включены параллельно; 5 – HJT; 6 – ЭГЛ и HJT включены последовательно

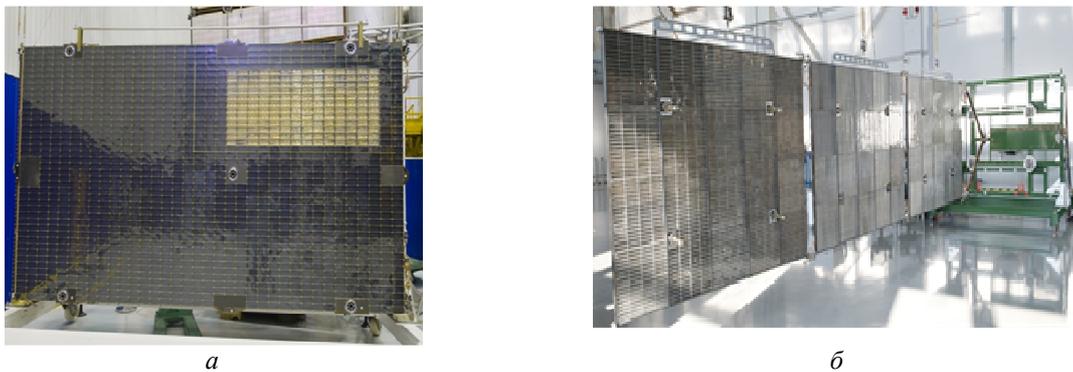


Рис. 3. Фотография полномасштабной концевой панели – (а) и крыла (б) космической солнечной батареи на основе концентраторных субмодулей и углепластиковой несущей конструкции, (АО «РЕШЕТНЁВ»)

Заключение. Разработанный фотоэлектрический модуль, являющийся элементарной ячейкой для космических концентраторных СБ нового поколения для КА, обеспечивает одновременно и независимо электрическую мощность  $\sim 400 \text{ Вт/м}^2$  InGaP/Ga(In)As/Ge электрогенерирующими линейками и до  $20 \text{ Вт/м}^2$  фотоактивными HJT Si теплопроводящими основаниями. При разориентации субмодуля вдоль и поперёк фокуса линейного концентратора на  $\pm 24^\circ$  мощность снижается соответственно до  $\sim 0,9$  и  $0,6$  от максимального значения.

### Библиографические ссылки

1. Kalinovskii V.S., Kontrosh E.V., Ionova E.A. et.al., Study of misorientation characteristics of hybrid solar cell-doubled linear lens concentrator system: AIP Conference Proceedings 2 September 2022. 2550 (1): 030002.
2. Kalinovskii V.S., Kontrosh E.V., Andreeva A.V., et.al., CPV Module based on a Hybrid Solar Cell: AIP Conference Proceedings. 2019. 2149. 030003.
3. Kalinovskii V.S., Ionova E.A., Andreeva A.V., et.al., Development and Investigation of Linear Fresnel Lens for Concentrator Space Solar Arrays: AIP Conference Proceedings. 2019. 2149. 070007.
4. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J.: Prog Photovolt Res Appl. 2021. 29: 3– 15.
5. Kuzoro V., Khalimanovich V., Kalinovskiy V., et.al.: Patent RU No 2014127672, published 07.07.2014.
6. Калиновский В.С., Теруков Е.И., Прудченко К.К., и др., Исследования радиационной стойкости гетероструктурных кремниевых солнечных элементов, Письма в ЖТФ, 16, с. 18, 2023

### References

1. Kalinovskii V.S., Kontrosh E.V., Ionova E.A. et.al., Study of misorientation characteristics of hybrid solar cell-doubled linear lens concentrator system: AIP Conference Proceedings 2 September 2022. 2550 (1): 030002.
2. Kalinovskii V.S., Kontrosh E.V., Andreeva A.V., et.al., CPV Module based on a Hybrid Solar Cell: AIP Conference Proceedings. 2019. 2149. 030003.
3. Kalinovskii V.S., Ionova E.A., Andreeva A.V., et.al., Development and Investigation of Linear Fresnel Lens for Concentrator Space Solar Arrays: AIP Conference Proceedings. 2019. 2149. 070007.
4. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J.: Prog Photovolt Res Appl. 2021. 29: 3– 15.
5. Kuzoro V., Khalimanovich V., Kalinovskiy V., et.al.: Patent RU No 2014127672, published 07.07.2014.
6. Kalinovskii V.S., Terukov E.I., Prudchenko K.K., et.al., Issledovaniya radiacionnoj stojkosti geterostrukturnyh kremnievyyh solnechnyh elementov: Pis'ma v ZhTF. 2023. 16. s. 18.

© Калиновский В. С., Теруков Е. И., Контрош Е. В., Прудченко К. К.,  
Толкачев И. А., Кузоро В. И., Халиманович В. И., 2023

УДК 629.76/78.001.63

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ X-ДИАПАЗОНА

Ю. А. Кисанов<sup>1</sup>, В. И. Церихов<sup>1</sup>, И. В. Матросова<sup>1</sup>, Ю. А. Чалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*Рассмотрены два варианта построения антенн X диапазона с ферменным и спицевым рефлектором. Разработаны конструкции обоих вариантов с точностью поверхности (СКО) не более 0,5 мм. Приведены сравнительные характеристики в развёрнутом и транспортировочном положениях.*

*Ключевые слова: двухзеркальные антенны, ферменный рефлектор, спицевый рефлектор, X диапазон, ленточный шарнир, пружины сжатия, кинематическое демпфирование.*

## DUAL-MIRROR X-BAND ANTENNAS

Yu. A. Kisanov<sup>1</sup>, V. I. Tserikhov<sup>1</sup>, I. V. Matrosova<sup>1</sup>, Yu. A. Chalova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*Two variants of the construction of X-band antennas with a truss and spoke reflector are considered. The designs of both variants have been developed with a surface accuracy of no more than 0.5 mm. Comparative characteristics in the unfolded and transport positions are given.*

*Keywords: two-mirror antennas, truss reflector, spoke reflector, X band, belt hinge, compression springs, kinematic damping.*

Антенны могут быть использованы в спутниковых систем различного назначения в X диапазоне при центральном закреплении на КА в двухзеркальном варианте с облучателем в виде фазированной решётки.

В зависимости от назначения полезной нагрузки на космический аппарат могут быть установлены антенны различных конфигураций. В данной работе представлены два исполнения двухзеркальной антенны X-диапазона – с ферменным и спицевым рефлекторами.

В первой антенне используется рефлектор, представляющий собой самораскрывающуюся ферму [1] габаритами в развёрнутом состоянии размером 4,1x4,6 метра, в транспортировочном положении 0,6x1,8 метра (рис. 1). Габаритный размер укладки по высоте определяется длиной складывающихся стержней, определяемой требованиями точности отражающей поверхности. Раскрытие происходит энергией гибких шарниров складывающихся стержней. Возможны варианты развёртывания в управляемом и неуправляемом (динамическом) режимах

Во второй антенне используется осесимметричный параболический рефлектор зонтичного типа.

В состав рефлектора (рис. 2) входят:

- опора рефлектора с механизмом раскрытия;
- спицы опорные и дополнительные;
- жесткий периферийный контур;
- сетеполотно

Для обеспечения заданной точности поверхностей рефлектор состоит из 72 спиц. На 24 опорных спицах шарнирно установлены по две дополнительные спицы. Опорная спица представляет собой сотовую панель толщиной 10мм. Дополнительные спицы представляют собой углепластиковые плоские фермы.

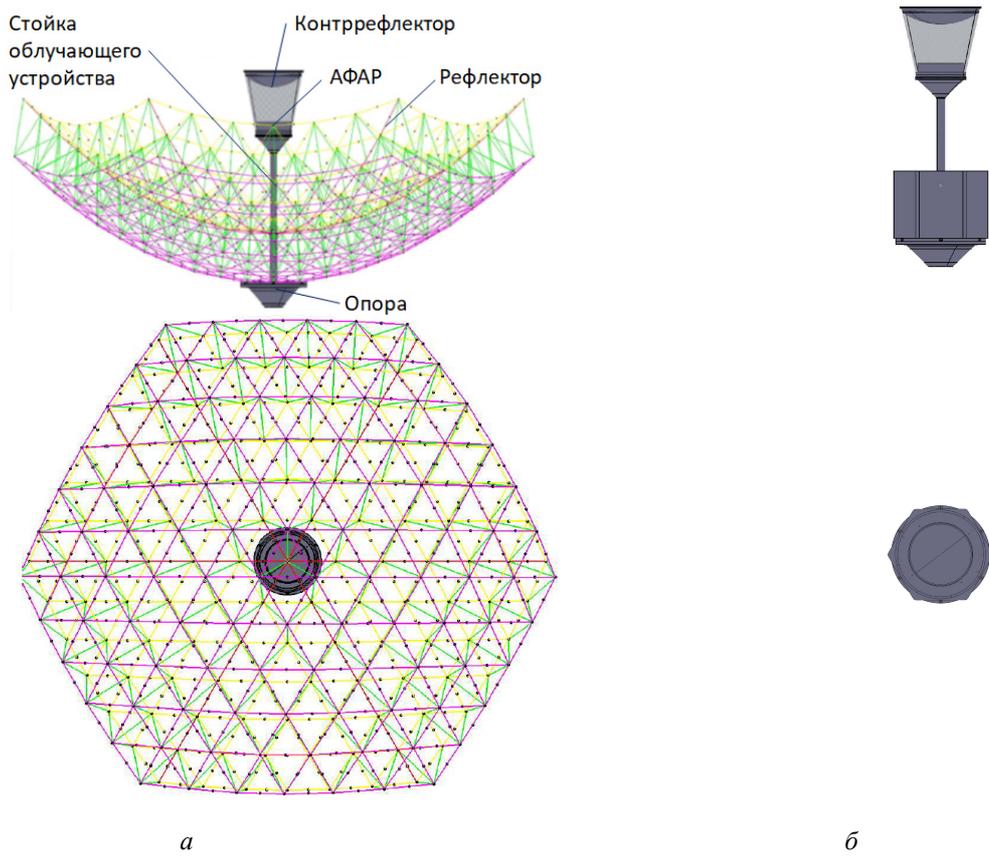


Рис. 1. Антенна с ферменным рефлектором:  
 а – раскрытое состояние рефлектора; б – сложенное состояние рефлектора

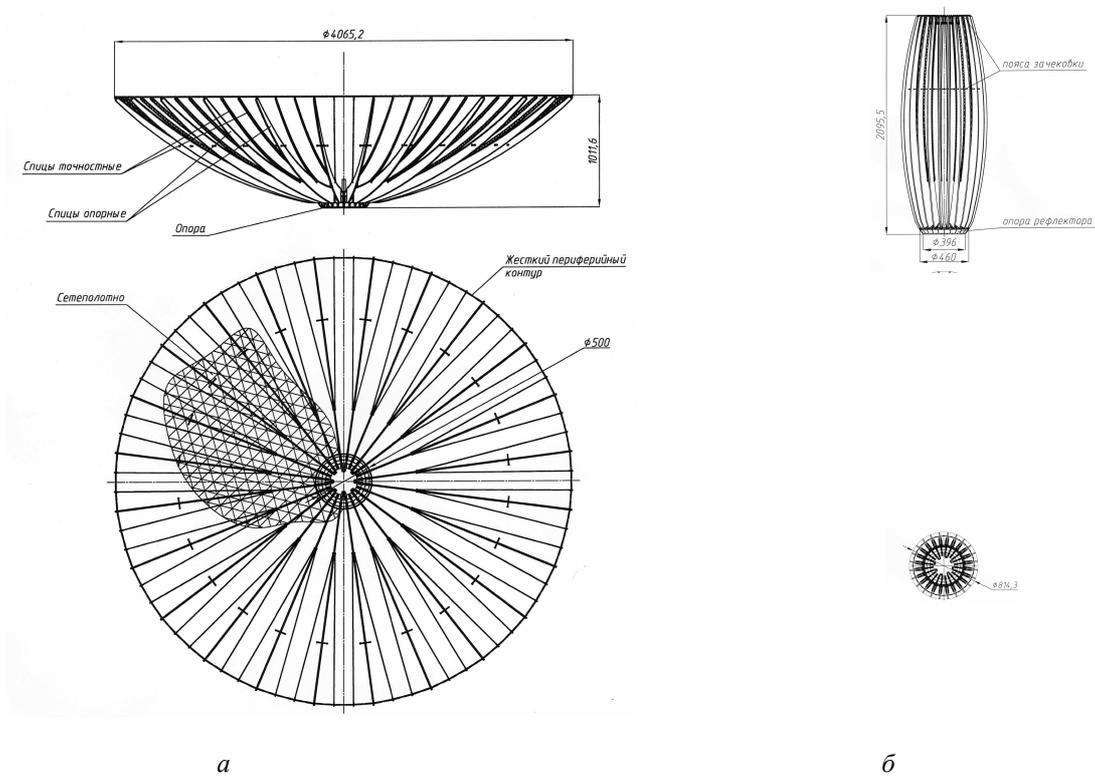


Рис. 2. Рефлектор зонтичного типа  
 а – раскрытое состояние рефлектора; б – сложенное состояние рефлектора

По периферии спицы соединены стержневой группой. Стержни между собой связаны гибким шарниром. Стержни со спицами связаны через двухступенные шарниры.

Опора рефлектора с механизмом раскрытия [2] предназначена для соединения составных частей рефлектора, раскрытия рефлектора и крепления рефлектора с КА. Возможны варианты конструктивного исполнения привода: пружинный с контролем развёртывания с помощью электродвигателя и без него, и прямой с применением электродвигателя.

#### **Библиографические ссылки**

1. Патент РФ, № 212183, 2022. Ю.А. Кисанов, И.В. Матросова, В.Е. Мешковский и др. Развертываемый рефлектор.
2. Патент РФ, № 206691, 2021. А.П.Белоглазов, Ю.А.Кисанов, И.В.Матросова и др. Развертываемый рефлектор.

#### **References**

1. Yu. A. Kisanov, I.V. Matrosova, V.E.Meshkovskiy et al. Deployable reflector. .Patent RF, no. 212183, 2022.
2. P. Beloglazov, Yu. A. Kisanov, I.V. Matrosova et al. Deployable reflector. .Patent RF, no. 206691, 2021.

© Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., Чалова Ю. А., 2023

УДК 629.76/78.001.63

## МОДУЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ РЕФЛЕКТОРЫ

О. К. Киселева<sup>1</sup>, Ю. А. Кисанов<sup>1</sup>, В. И. Церихов<sup>1</sup>, И. В. Матросова<sup>1</sup>, Ю. А. Чалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: tsmos@iss-reshetnev.ru

*Показана необходимость модульного принципа при построении больших рефлекторов в космосе. Определены тип и размеры модулей. Намечены технологии вывода на орбиту и роботизированной сборки рефлекторов.*

*Ключевые слова: большой космический рефлектор, модульный принцип, модуль, ферменная конструкция, роботизированная сборка, система обеспечения точности поверхности рефлектора*

## MODULAR SPACE REFLECTORS

O. K. Kiseleva<sup>1</sup>, Yu. A. Kisanov<sup>1</sup>, V. I. Tserikhov<sup>1</sup>, I. V. Matrosova<sup>1</sup>, Yu. A. Chalova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: tsmos@iss-reshetnev.ru

*The necessity of the modular principle in the construction of large reflectors in space is shown. The type and dimensions of the modules are determined. Technologies for launching into orbit and robotic assembly of reflectors are planned.*

*Keywords: large space reflector, modular principle, module, truss structure, robotic assembly, system for ensuring the accuracy of the reflector surface*

В настоящее время перспективным направлением по освоению космического пространства является применение крупногабаритных космических рефлекторов.

Наиболее приемлемым вариантом изготовления таких конструкций является модульная сборка, заключающаяся в том, что модули оптимального размера создаются на Земле, выводятся в космос, затем собираются роботизировано в рефлектор необходимого размера. Такой принцип был анонсирован еще в 80-х годах XX века группой ученых в труде «Неограниченно наращиваемый радиотелескоп» [1].

Модульный принцип предполагает создание в наземных условиях унифицированных элементов (модулей) с дальнейшей сборкой их на орбите. Модули при современном уровне развития технологий создаются на Земле с обеспечением заданных характеристик.

Главная проблема создания крупногабаритного модульного рефлектора состоит в разработке технологии сборки на орбите [2,3]. Сложность этого процесса обуславливается ограниченностью технологических возможностей роботизированной сборки в космосе, что предъявляет особые требования к конструкции модуля.

На первом этапе для отработки всего комплекса технологий предлагается создать модульный космический рефлектор размером порядка 30 м с сетчатой отражающей поверхностью, состоящий из семи 12-и метровых модулей, которые будут созданы на Земле и в сложенном виде доставлены на орбиту под обтекателем РН.

В результате анализа возможных конструкций нами был выбран вариант рефлектора с ферменным каркасом, который обеспечивает возможность стыковки модулей, а также обладает достаточной жесткостью и механическими характеристиками для обеспечения заданной точности.

Наиболее реальным потребителем крупногабаритного модульного рефлектора является радиоастрономия. Прототипом создаваемого рефлектора является радиотелескоп «Радиоастрон» АКЦ «ФИАН». Предлагаемая конструкция предполагает создание рефлектора размером 30 м на первом этапе, работающего на длинах волн 1,35, 6,2, 18 и 92 см. Необходимость работы на длине волны 1,35 см обуславливает необходимость точности поверхности рефлектора (СКО)  $0,5 \pm 1$  мм.

Рефлектор размером 30 метров с фокусным расстоянием 13 метров может быть создан из семи 12-и метровых модулей. Точность поверхности модуля (СКО) составляет 0,5 мм, что требует 8-и пролётного ферменного каркаса [4]. Конечная точность всего рефлектора не должна превышать 1 мм, что обеспечит приемлемую работоспособность на длине 1,35 см и отличные характеристики на остальных длинах волн. Модульный рефлектор представлен на рис. 1.

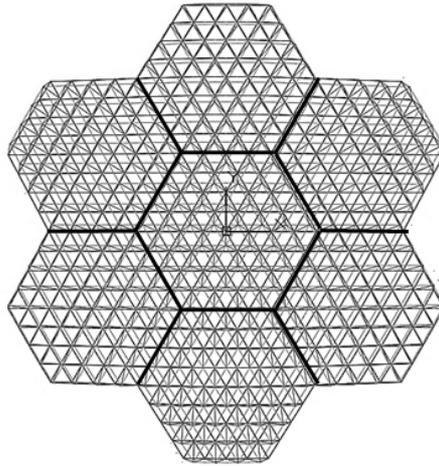


Рис. 1. Конструкция модульного космического рефлектора размером 30 метров

На рис. 2 приведен вид модуля размером 12 метров с 8-ми пролетным ферменным каркасом. Такой модуль может быть собран на стапеле размером порядка 12 метров в типовом помещении размером  $15 \times 30 \times 10$  м.

В сложенном виде модуль представляет собой цилиндр с высотой 1,7 м и диаметром 0,8 м. Семь модулей могут быть размещены под обтекателем РН и выведены на орбиту одним пуском, например, с использованием РН «Союз-2.1б» с обтекателем диаметров 3,715 м [5]. Под обтекателем РН модули могут находиться в сложенном виде, закрепленными на силовых элементах (балках), присоединенных к адаптеру (рис. 3). При этом остается достаточно пространства для дополнительной полезной нагрузки.

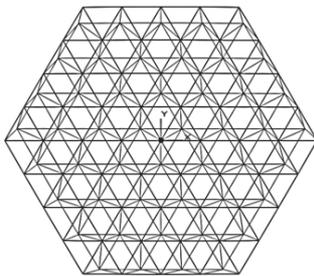


Рис. 2. Конструктивная схема модуля ферменной конструкции

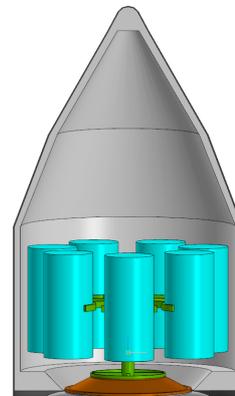


Рис. 3. Схема размещения сложенных модулей под обтекателем РН

Управляемое развёртывание происходит за счёт пружинного привода под управлением системы контроля развёртывания с применением электродвигателя. Сборка рефлектора производится на причале космонавтами или роботами-манипуляторами в определенной последовательности.

Радиотелескоп может быть использован в нескольких вариантах: в виде отдельного космического аппарата, в составе орбитальной станции, на лунной космической базе.

#### **Библиографические ссылки**

1. Буйкас В. И., Гвамичава А. С., Горшков Л. А. и др. Неограниченно наращиваемый космический радиотелескоп // Космические исследования, т.16, вып.5, 1978, с.767-776.
2. John M. Hedgepert and Louis R. Adams. Design Concepts for Large Reflector Antenna Structures. NASA Contractor Report. January 1983.
3. К. Гетланд. Космическая техника. Иллюстрированная энциклопедия. Гл.16. 1982 г.
4. Robert E. Freeland, Richard G. Helms. Deployable Antenna Structures Technologies. Large Space Apertures Workshop. November 2008.
5. SOYUZ USER'S MANUAL ISSUE 3, REVISION 0 APRIL 2001.

#### **References**

1. Buyakas V. I., Gvamichava A. S., Gorshkov L. A. and others. Neogranicheno narashchivaemyj kosmicheskij radioteleskop // Kosmicheskie issledovaniya, t. 16, no. 5, 1978, p. 767-776.
2. John M. Hedgepert and Louis R. Adams. Design Concepts for Large Reflector Antenna Structures. NASA Contractor Report. January 1983.
3. K. Getland. The Illustrated Encyclopedia of space technology. Ch. 16. 1982 г.
4. Robert E. Freeland, Richard G. Helms. Deployable Antenna Structures Technologies. Large Space Apertures Workshop. November 2008.
5. SOYUZ USER'S MANUAL ISSUE 3, REVISION 0 APRIL 2001.

© Киселева О. К., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., Чалова Ю. А., 2023

УДК 539.3

## АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ СЕТЧАТОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева, А. Н. Кожевников, С. В. Шайдуров

Новосибирский государственный технический университет  
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20  
E-mail: tburn@mail.ru

*Построены и проанализированы на прочность дискретные модели трансформируемых анизотридных оболочек в Ansys Mechanical APDL. Дополнительно проводится исследование на устойчивость конструкций.*

*Ключевые слова: трансформируемые анизотридные оболочки, ANSYS Mechanical APDL, прочность, устойчивость.*

## ANALYSIS OF THE STRENGTH OF A MESH TRANSFORMABLE STRUCTURE MADE OF COMPOSITE MATERIAL

L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva, A. N. Kozhevnikov, S. V. Shaidurov

Novosibirsk State Technical University  
20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
Email: tburn@mail.ru

*Discrete models of transformable anisogrid shells in Ansys Mechanical APDL are constructed and analyzed for strength. Additionally, a study is being conducted on the stability and rigidity of structures.*

*Keywords: transformable anisogrid shells, ANSYS Mechanical APDL, strength, rigidity, stability.*

### Введение

Конструкции с вертикальными разрезами используются в космической промышленности. Их использование обусловлено повышенной жесткостью, прочностью и устойчивостью при небольшой массе [1-3]. Конструкция с вертикальными разрезами при выходе на орбиту испытывает осевое сжатие равное 102 т.с., а на орбите в разложенном состоянии кручение равно 1 т.с. на м (рис. 1). Поэтому актуальной задачей становится исследование на прочность такого типа конструкций.

Рассматривается анизотридная оболочка с вертикальными разрезами подкрепленными продольными ребрами из композиционного материала (углепластик) регулярной структуры при сжатии в собранном виде (рис. 1, а) и кручении на орбите (рис. 1, б). Масса конструкции равна 165 кг.

На нижнем шпангоуте конструкции в собранном виде с вертикальными разрезами располагаются сферические шарниры, а в раскрытой оболочке закрепляется одна точка по всем степеням свободы.

Рассматривая задачу с вертикальными разрезами можно отметить следующее, что она нелинейная [4], следовательно, при численном расчете нельзя использовать условие симметрии.

Для численного решения задачи использовался программный комплекс *ANSYS Mechanical APDL*. В конечно – элементную модель закладывались два элемента, что связано с особенностью задачи [5, 6]. Нагрузка на узлы верхнего шпангоута передавалась через мнимый узел, расположенный по высоте в центре конструкции при помощи топологических связей. Элемент *beam4* двухузловой с шестью степенями свободы на каждый узел закладывался в реберную структуру. Для моделирования топологических связей использовался *MPC184* характеризующиеся как ограничительный. Расчет на прочность и устойчивость проводился для конструкций с вертикальными разрезами в собранном состоянии с 60 парами спиральных ребер и углом наклона в 20° (рис. 2).

На рис.3 показано напряжено-деформированное состояние и формы потери устойчивости разложенной конструкции.

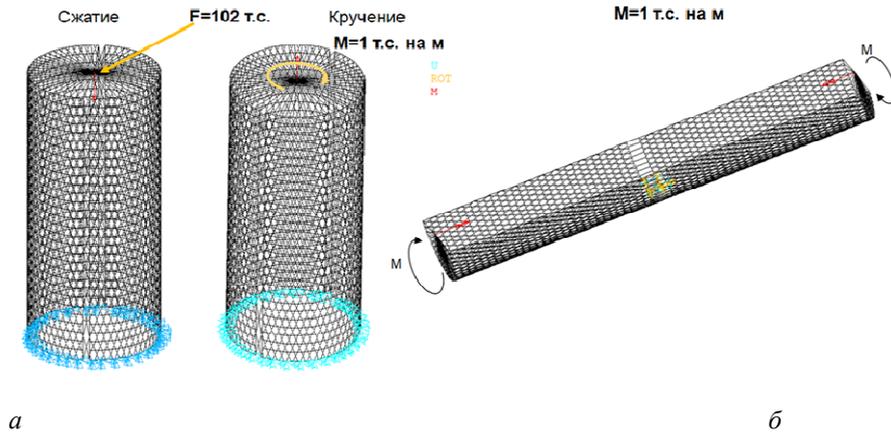


Рис. 1. Граничные условия анизотридной трансформируемой конструкции:  
 а – анизотридная конструкция с вертикальными разрезами; б – разложенная сетчатая оболочка

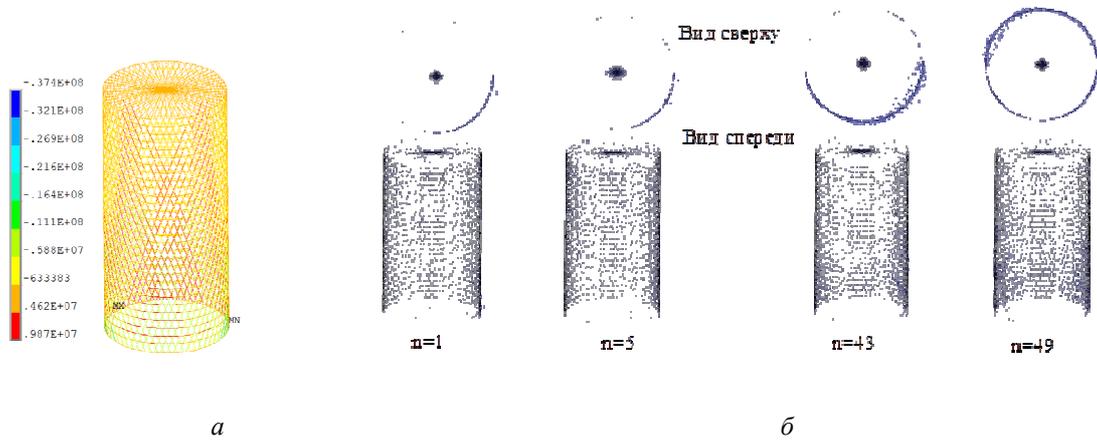


Рис. 2. Расчет на напряженно-деформированное состояние и устойчивость анизотридной конструкции с вертикальными разрезами при сжатии:  
 а – напряженно-деформированное состояние анизотридной конструкции с вертикальными разрезами;  
 б – формы потери устойчивости

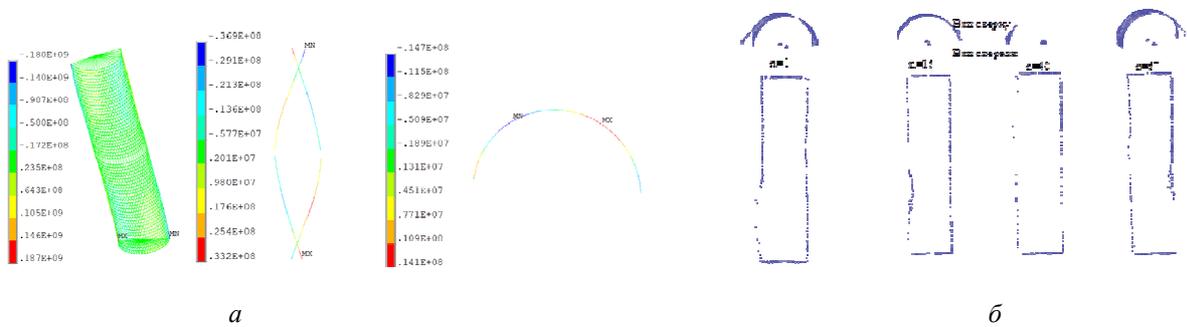


Рис. 2. Расчет на напряженно-деформированное состояние и устойчивость раскрытой анизотридной конструкции при кручении:  
 а – напряженно – деформированное состояние анизотридной конструкции с вертикальными разрезами;  
 б – формы потери устойчивости

Анализ напряженно-деформированного состояния сетчатых оболочек с вертикальными разрезами при осевом сжатии равным 102 т.с. показывает следующее: спиральные ребра сжимаются, а кольцевые растягиваются. Данный тип конструкции не разрушается при приложенной к ней осевой сжимающей нагрузке. Данный тип конструкций имеет особую структуру, которая перераспределяет нагрузки за счет топологических связей и продольных ребер [7-8]. Продольные ребра в свою очередь принимают на себя большую часть приложенных нагрузок.

Локальные зоны потери устойчивости в конструкции с вертикальными разрезами располагаются вдоль продольных ребер в нижней части конструкции. Слом продольных ребер наблюдается на первых формах потери устойчивости при осевом сжатии конструкции. При кручении разрушение элементов реберной структуры происходит на высших формах потери устойчивости.

Анализ напряженно-деформированного состояния разложенной анизотридной конструкции при кручении равном 1 т.с. на метр показывает следующее: в спиральных ребрах и кольцевых имеются зоны растяжения и сжатия. Данный тип конструкции не разрушается при приложенном к ней крутящем моментом.

В формах потери устойчивости разложенной конструкции наблюдаются зоны локальной потери устойчивости приходящиеся на продольные ребра, ограничивающие конструкцию.

### Библиографические ссылки

1. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В. В. Васильев. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
2. Ковальчук Л. М. Анализ деформирования ребер сетчатых цилиндрических оболочек при кручении = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. Текст : непосредственный // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 23 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию основания конструкторского бюро «Туполев», Новосибирск, 20–22 апр. 2022 г. : в 4 т. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. Т. 1. С. 43–47. 25 экз. ISBN 978-5-7782-4693-5.
3. Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при кручении = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева, С. В. Шайдуров. Текст : электронный // Решетневские чтения : материалы 26 междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-косм. систем М. Ф. Решетнева, Красноярск, 9–12 нояб. 2022 г. : в 2 ч. Красноярск : Изд-во СибГУ, 2022. Ч. 1. С. 104–106. ISBN 978-5-86433-924-4. 1 CD-ROM.
4. Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при статическом нагружении = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-1-81-92. Текст : непосредственный // Сибирский аэрокосмический журнал = Siberian Aerospace Journal. 2022. Т. 23, № 1. С. 81–92.
5. Ковальчук Л. М. Подход к рациональному проектированию реберной структуры сетчатой оболочки без обшивки с учетом ее массы и приложенной нагрузки / Л. М. Ковальчук ; науч. рук. Т. В. Бурнышева. Текст : электронный // Россия молодая : сб. материалов 13 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Кемерово, 20–23 апр. 2021 г. Кемерово : ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», 2021. URL: [content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/042101.pdf](https://content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/042101.pdf) (дата обращения: 28.01.2022). ISBN 978-5-00137-232-5.
6. Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния сетчатой композитной оболочки без обшивки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. Текст : непосредственный // Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 7–10 сент. 2022 г. Новосибирск : СибНИА им. С. А. Чаплыгина, 2022. С. 37–39. ISBN 978-5-6043216-4-5.
7. Ковальчук Л. М. Конечно-элементный расчёт на прочность и устойчивость анизотридной оболочки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева ; науч. рук. Т. В. Бурнышева. Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 16 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г. : в 11 ч. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. Ч. 11. С. 30–34. 100 экз. ISBN 978-5-7782-4872-4.

8. Ковальчук Л. М. Влияние реберной структуры на устойчивость сетчатой оболочки при статическом сжатии / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. Текст : непосредственный // *Материалы 22 Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021)*, Алушта, 4–13 сент. 2021 г. Москва : Изд-во МАИ, 2021. С. 226-228. 400 экз. ISBN 978-5-4316-0824-7.

### References

1. Vasiliev, V. V. *Mechanics of structures made of composite materials* [Text] / V. V. Vasiliev. M.: Mashinostroenie, 1988. 272 p.

2. Kovalchuk L. M. Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva. Text : direct // *Science. Industry. Defense : tr. 23 Vseros. nauch.-tech. conf., dedicated. To the 100th anniversary of the foundation of the Tupolev Design Bureau, Novosibirsk, April 20-22, 2022: in 4 volumes*. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2022. Vol. 1. pp. 43-47. 25 copies. ISBN 978-5-7782-4693-5.

3. Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva, S. V. Shaidurov. Text : electronic // *Reshetnev readings : materials of 26 international scientific and practical conf., dedicated. memory of the general designer of rocket-space. M. F. Reshetnev's systems, Krasnoyarsk, November 9-12, 2022 : at 2 o'clock*. Krasnoyarsk : SIBGU Publishing House, 2022. Part 1. pp. 104-106. ISBN 978-5-86433-924-4. 1 CD-ROM.

4. Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva. DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-1-81-92. Text : direct // *Siberian Aerospace Journal = Siberian Aerospace Journal*. 2022. Vol. 23, No. 1. pp. 81-92.

5. Kovalchuk L. M. An approach to the rational design of the rib structure of the mesh shell without sheathing, taking into account its mass and applied load / L. M. Kovalchuk ; scientific hand. T. V. Burnysheva. Text : electronic // *Young Russia : collection of materials 13 All-Russian Scientific and Practical conference with international participation, Kemerovo, April 20-23, 2021 Kemerovo : Kuzbass State Technical University. T. F. Gorbachev University*", 2021. URL: [content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/042101.pdf](https://content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/042101.pdf) (accessed: 28.01.2022). ISBN 978-5-00137-232-5.

6. Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state of a mesh composite shell without sheathing during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva. Text : direct // *Problems of strength of aircraft structures and materials : materials of All-Russian Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, September 7-10, 2022 Novosibirsk : SibNIA named after S. A. Chaplygin*, 2022. pp. 37-39. ISBN 978-5-6043216-4-5.

7. Kovalchuk L. M. Finite element calculation for the strength and stability of an anisogrid shell under torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva ; scientific hand of T. V. Burnysheva. Text : direct // *Science. Technologies. Innovations : Sat. scientific tr. 16 All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, 5-8 Dec. 2022 : at 11 a.m*. Novosibirsk : Publishing House of NSTU, 2022. Part 11. pp. 30-34. 100 copies ISBN 978-5-7782-4872-4.

8. Kovalchuk L. M. The influence of the rib structure on the stability of the mesh shell under static compression / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva. Text : direct // *Proceedings of the 22nd International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS'2021)*, Alushta, September 4-13, 2021 Moscow : Publishing House of MAI, 2021. pp. 226-228. 400 copies ISBN 978-5-4316-0824-7.

© Ковальчук Л. М., Бурнышева Т. В., Кожевников А. Н., Шайдуров С. В., 2023

УДК 629.78

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ИНТЕРФЕЙСОВ АДАПТЕРА КОНИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Ю. С. Кравченко, О. А. Исева

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: nazarenkous@iss-reshetnev.ru

*Рассмотрен процесс проектирования сетчатой оболочки адаптера конического космического аппарата и интерфейсных элементов для обеспечения стыковки космического аппарата с разгонным блоком и установки оборудования.*

*Ключевые слова: космический аппарат, адаптер конический, композитные материалы, сетчатая конструкция, разгонный блок, спиральные ребра, кольцевые ребра, шпангоут, интерфейс.*

## DESIGN OF THE STRUCTURE AND INTERFACES OF THE CONICAL SPACECRAFT ADAPTER

Yu. S. Kravchenko, O. A. Iseva

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: nazarenkous@iss-reshetnev.ru

*The review of process of designing grid body of the conical spacecraft adapter and interface elements for connection of the spacecraft with the upper stage and for installing equipment.*

*Keywords: spacecraft, conical adapter, composite materials, grid structure, upper stage, spiral ribs, ring ribs, frame, interface element.*

Адаптер конический (АК) космического аппарата (КА) – конструктивный силовой элемент, соединяющий между собой КА и разгонный блок (РБ) и обеспечивающий требуемое распределение действия нагрузок между ними [1].

АК КА, должен иметь заданную несущую способность, обеспечивающую его целостность при внешних воздействиях, а также надежную фиксацию КА с РБ, т. е. обладать повышенной жесткостью и прочностью. Другими требованиями, предъявляемыми к АК КА, являются требования по обеспечению оптимальных значений основных параметров [2]:

- высокой степени надежности;
- высокой степени унификации;
- высокой степени технологичности;
- размеростабильности;
- низкой себестоимости;
- низкой массы.

Выбор конфигурации и типа сетчатой конструкции при проектировании зависит от воздействия комбинации статических и динамических нагрузок. Также действие нагрузок может приводить к возникновению локальных напряжений ребер сетчатой оболочки АК КА.

Исходя из этих условий, определяют угол наклона и количество спиральных ребер, количество и шаг кольцевых ребер, которые задают боковую жесткость и придают свойство самостабилизации сетчатой оболочке АК КА [3]. Параметры ребер подбираются с обеспечением условия минимальной массы, а также необходимой прочности и жесткости конструкции сетчатой оболочки [4].

При равномерном характере распределения нагрузок для обеспечения стыка с РБ, а также с учетом требований о размещении оборудования устройства отделения (УО) – для АК применима схема равномерного плетения сетчатой оболочки. Как результат в применении данной схемы отсутствует потребность в локальном усилении сетчатой структуры за счет выполнения зон сосредоточения спиральных ребер и дополнительных усиливающих элементов сетчатой структуры, что ведет за собой значительное снижение массы [5].

Рассматриваемый АК КА, представляет собой сетчатую оболочку вращения конической формы из композиционных материалов, содержащий верхний и нижний шпангоуты с множеством пересекающихся спиральных, обоих направлений, и кольцевых ребер из однонаправленных полимерных волокон. Верхний шпангоут выполнен из металла, а нижний – из композитного материала, усиленный в местах крепления с РБ металлическими пластинами П-образной формы, закрепленными на шпангоуте при помощи клеевого соединения. Шпангоуты имеют форму колец, в которые интегрированы кольцевые и спиральные ребра. Спиральные ребра расположены с одинаковым шагом друг от друга вдоль цилиндрической поверхности шпангоутов и соединяют шпангоуты между собой. При этом одна половина спиральных ребер ориентирована под углом к плоскости шпангоутов, а вторая половина ориентирована зеркально первой половине. Кольцевые ребра ориентированы параллельно плоскости шпангоутов и расположены между ними. На верхнем металлическом шпангоуте выполнены посадочные отверстия в местах крепления с КА, а также места и отверстия для установки оборудования УО. В нижнем шпангоуте и металлических пластинах в местах крепления с РБ выполнены посадочные отверстия. Отверстия могут быть использованы для монтажа такелажного оборудования. АК КА изготавливается с учетом требований к конструкции с использованием технологии изготовления методом «мокрой» намотки угольной нити, пропитанной эпоксидным связующим. Ребра сетчатой оболочки выполнены из углепластика на основе углеродного волокна, пропитанного эпоксидным связующим (рис. 1) [4].

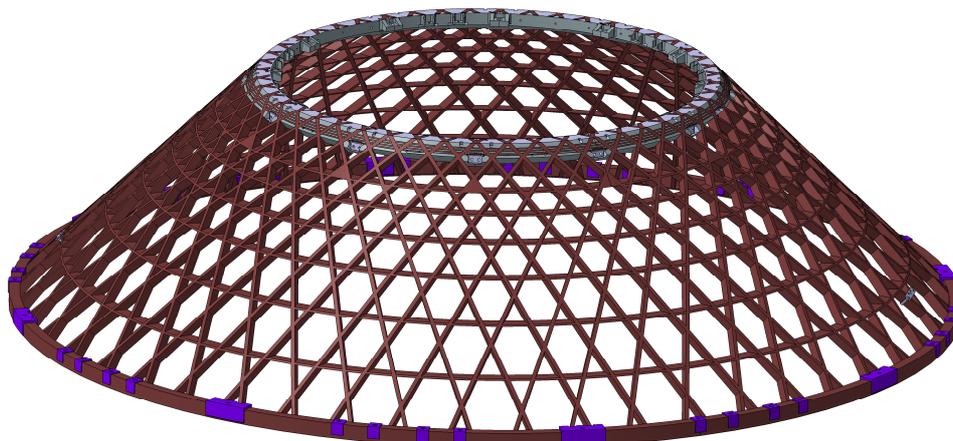


Рис. 1. Адаптер конический космического аппарата

Обеспечение заданным требованиям и снижение массы АК КА достигаются за счет:

- баланса оптимальных значений основных параметров АК КА сетчатой структуры с минимальным количеством ячеек разных форм и размеров, отсутствием дополнительных усиливающих элементов;
- гарантии целостности АК при стыковке с сопрягаемыми конструкциями, посредством организации интеграции ребер в шпангоуты, а также усиления нижнего композитного шпангоута металлическими пластинами;
- организации мест и отверстий для установки элементов УО на верхнем металлическом шпангоуте;
- обеспечение стыковки с КА, за счет организации в верхнем металлическом шпангоуте посадочных отверстий и мест;
- обеспечение стыковки с РБ, за счет организации в нижнем композитном шпангоуте с металлическими пластинами посадочных отверстий.

Можно сделать вывод, что рассматриваемый вариант исполнения АК КА и его интерфейсов, является универсальным и позволяет выполнять установку всех элементов оборудования УО на верхнем

металлическом шпангоуте и стыковку с РБ по нижнему шпангоуту вне зависимости от их конфигурации.

### Библиографические ссылки

1. Пат. №212849 Российская Федерация, МПК В64G 1/22, В32В 5/14. Адаптер конический космического аппарата / Ю.С. Кравченко, О.А. Исеева, Е.Д. Мироненко, С.В. Авкельгин; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации (RU). №2019138289; заявл. 27.11.2019; опубл. 17.03.2020, Бюл. №23. 10 с.
2. Пат. №215544 Российская Федерация, МПК В64G 1/22, В64С 1/10. Шпангоут адаптера конического для космического аппарата / Е.Д. Мироненко, С.В. Авкельгин, А.В. Жуков; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (RU). №2022127523; заявл. 24.10.2022; опубл. 16.12.2022, Бюл. №35. 11 с.
3. Пат. №218366 Российская Федерация, МПК В64G 1/22, В32В 5/14. Адаптер конический космического аппарата / О.А. Исеева, Ю.С. Кравченко, Е.Д. Мироненко, С.В. Авкельгин; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (RU). №2022122221; заявл. 16.08.2022; опубл. 23.05.2023, Бюл. №15. 12 с.
4. Пат. №218843 Российская Федерация, МПК В64G 1/22, В32В 5/14. Адаптер конический космического аппарата / О.А. Исеева, Ю.С. Кравченко, Е.Д. Мироненко, С.В. Авкельгин; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (RU). №2022123217; заявл. 30.08.2022; опубл. 14.06.2023, Бюл. №17. 10 с.
5. Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И. Анизогридные композитные сетчатые конструкции разработка и приложение к космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. №3. С.38-50.

### References

1. Kravchenko Yu.S., Iseeva O.A., Mironenko E.D., Avkel'gin S.V. Adapter konicheskii kosmicheskogo apparata [Conical spacecraft adapter]. Patent RF, no 212849, 2020.
2. Mironenko E.D., Avkel'gin S.V., Zhukov A.V. Shpangout adaptera konicheskogo dlya kosmicheskogo apparata [Frame of the conical adapter for the spacecraft]. Patent RF, no 215544, 2022.
3. Iseeva O.A., Kravchenko Yu.S., Mironenko E.D., Avkel'gin S.V. Adapter konicheskii kosmicheskogo apparata [Conical spacecraft adapter]. Patent RF, no 218366, 2023.
4. Iseeva O.A., Kravchenko Yu.S., Mironenko E.D., Avkel'gin S.V. Adapter konicheskii kosmicheskogo apparata [Conical spacecraft adapter]. Patent RF, no 218843, 2023.
5. Vasil'ev V.V., Barynin V.A., Razin A.F., Petrokovskiy S.A., Khalimanovich V.I. [Anizogridnye composite mesh design development and application of space technology] Kompozity i nanostruktury, 2009, no.3, pp.38-50. (In Russian.)

© Кравченко Ю. С., Исеева О. А., 2023

УДК 669.713.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРСИВНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
С УПРАВЛЯЕМОЙ МОРФОЛОГИЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ  
ТЕРМОАКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

А. Н. Лихачев

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1  
E-mail: alikhachev@yandex.ru

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований реверсивных трансформируемых конструкций космической техники с управляемой морфологией на основе эластомерных термопластичных композиционных материалов. Показана возможность использования такого подхода как базы для разработки нового класса конструкций, изменяющих свою форму и физико-механические характеристики (жесткостные и диссипативные) для создания компактных конструкций с высоким коэффициентом трансформации.*

*Ревверсивные трансформируемые конструкции, морфологические характеристики, функциональные свойства актуаторов, фазовый переход, эластомерные термопластичные композиционные материалы, управляемые структуры.*

**INVESTIGATION OF REVERSIBLE TRANSFORMABLE STRUCTURES  
WITH CONTROLLED MORPHOLOGY BASED ON ELASTOMERIC  
THERMOACTIVE COMPOSITE MATERIALS**

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University "Voenmeh" D. F. Ustinov  
1, 1st Krasnoarmeyskaya str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation  
E-mail: alikhachev@yandex.ru

*The results of theoretical and experimental studies of reversible transformable structures of space technology with controlled morphology using elastomeric thermoplastic composite materials are presented. The possibility of using such an approach as a basis for the development of a new class of structures that change their shape and physical and mechanical characteristics (stiffness and dissipative) to create compact structures with a high transformation coefficient is shown.*

*Reversible transformable structures, morphological characteristics, functional properties of actuators, phase transition, elastomeric thermoplastic composite materials, controlled structures.*

Традиционный подход создания конструкций, в том числе и авиационно-космической техники, связан с разработкой, структур с низменной морфологией и постоянными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Создание конструкций, изменяющих свою форму, структуру и подстраивающих свои функционально-эксплуатационные характеристики в процессе работы с учётом изменяющихся внешних и внутренних условий, является актуальной задачей для многих систем авиационно-космической техники. В работе рассмотрены морфологически изменяемые структуры, приводимые в действие термоактивными композиционными материалами (ТКМ), играющими роль актуаторов, работающих на основе фазового перехода и являющиеся частью эластичных композиционных конструкций, созданных на базе гиперэластичных материалов и армирующих структур. Известны примеры использования «интеллектуальных» материалов для решения подобных задач [1]. Последние исследования показали перспективность использования в таких структурах мульти-материальных структур (ММС), обеспечивающих более эффективное использования такого подхода для реализации управления морфологией несущей структуры. Рассмотрен базовый элемент такой

структуры, состоящей из двух материалов, один из которых, является активным, а второй, – пассивным [2]. Для фундаментального случая ММС, состоящей из одного активного и одного пассивного слоя, поведение конструкции, во времени (в терминах «кривизны») определяется как:

$$1/\rho(t) = [H_I (1 - e^{-t/\tau_1}) + H_{II} (1 - e^{-t/\tau_{II}})] / \{h/2 + 2(E_1 I_1 + E_2 I_2) / h\} \cdot [(1/(E_1 \cdot a_1) + 1/(E_2 \cdot a_2))], \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $\rho$  – радиус кривизны,  $h$  – общая толщина образца,  $a_i$  – толщин отдельных слоёв структуры,  $E_i$  модуль Юнга каждого из слоёв,  $I_i$  – второй момент инерции площади слоя, 1 и 2- индексы активного и пассивного слоя,  $H_I$  – константа, зависящая от модулей Юнга слоёв и разницы напряжений на их границе,  $\tau_1$  – постоянная времени. Исходя из условий равновесия и совместимости, выводится двух-экспоненциальный закон, для моделирования изменения характеристик изделия во времени.

Уравнение (1) используется, при «включении» системы. При «выключении», структура возвращается к своей первоначальной форме, или же фиксируется в новом положении. Для этого случая управляющее уравнение принимает следующий вид:

$$(1/\rho)_{\text{off}} = K_I e^{-t/\tau_1} + K_{II} e^{-t/\tau_{II}}. \quad (2)$$

Результаты экспериментальных исследований подтвердили выражения (1) и (2) (рис. 1–3). Показано, что влияние на изменение формы и свойств ММС определяются различием деформаций активных и пассивных структур, приводящих к возникновению внутренних напряжений и изменению её формы. Исследованы модели реверсивных структур с управляемой морфологией на основе эластомерных ТКМ. Предложена модель работы такой структуры, на основе механизма изгиба, приводящего к извитости конструкции в процессе её деформации. Рассмотрена взаимосвязь между структурными изменениями в стенке эластичного базового элемента и макроскопическим поведением всей конструкции. Проведены оценки и моделирование прогиба такой системы с использованием модели стенки силового элемента, армированной  $N$  волокнами и оценки их влияния на прогиб. Показано, что критическое давление нелинейно возрастает с увеличением коэффициента осевого растяжения, при этом модель с  $N$  волокнами предсказывает более высокие критические давления потери устойчивости, чем известная модель Фунга [3]. Предложенная модель позволило связать критическую нагрузку при изгибе с микроскопическим изменением матрикса, влияющим на механическую жесткость и критическое давление. С использованием уравнения равновесия для цилиндрической структуры с внутренним давлением  $p$  и осевой нагрузкой  $N$ , получено выражение для критического давления потери устойчивости  $p_{cr}$  в виде:

$$p_{cr} = \left[ N + \left( \frac{\lambda_{20} \pi}{l_e} \right)^2 H \right] / (\pi r_i^2), \quad (3)$$

где  $l_e$  – эквивалентная длина, равная половине длины цилиндра с фиксированными концами, а  $H$  функция связи моментов инерции эластомерного элемента и микроструктурных характеристик, определяемая следующим выражением:

$$H = \pi \int_{r_1}^{r_2} \left( J_z - \frac{1}{3} J_\theta \right) r^3 dr + \frac{\pi r_1^3}{3} \int_{r_1}^{r_2} J_\theta dr. \quad (4)$$

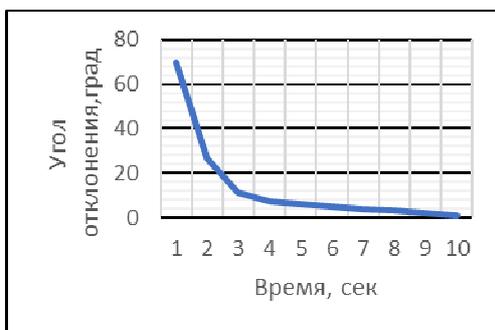


Рис. 1. Изменение угла поворота



Рис. 2. Изменение кривизны структуры

Результаты моделирования показали, что критическое давление потери устойчивости нелинейно возрастает с увеличением степени растяжения. Изменения в структуре материала влияют на критическое давление потери устойчивости. Отмечается доминирующую роль спиральных волокон, влияющих на извивистость исследуемой конструкции и её управляемость.

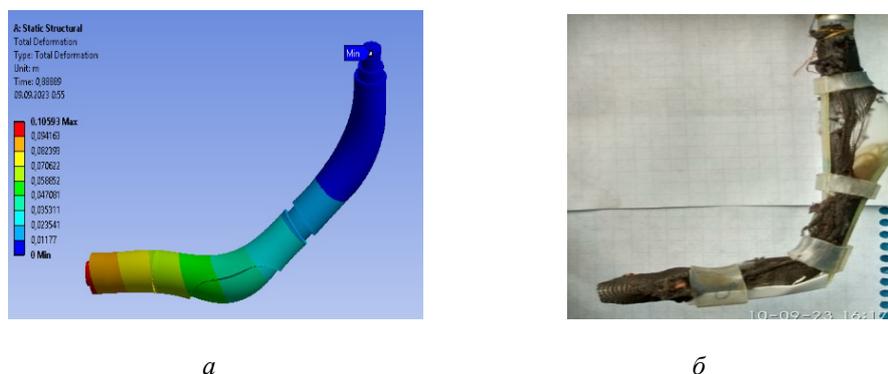


Рис. 3. КЭ модель деформации структуры (а); деформация физической модели структуры (б)

Преимущество использования этой модели из N волокон заключается в ее способности увязывать микроструктурные изменения волокон (долю спиральных волокон и их ориентацию) с их влиянием на общую механическую нестабильность системы.

#### Библиографические ссылки

1. Liu, C.; Qin, H.; Mather, P. Review of progress in shape-memory polymers. *J. Mater. Chem.* 2007, 17, 1543–1558
2. Лихачёв А.Н. Теоретические основы создания конструкций с изменяемыми морфологическими и функциональными характеристиками// Решетневские чтения: материалы XXIII Междунар. науч. конф. (10-13 ноября, 2019, г. Красноярск)
3. Fung, YC. *Biomechanics: motion, flow, stress, and growth*. New York:Springer-Verlag;1990.

#### References

1. Liu, C.; Qin, H.; Mather, P. Review of progress in shape-memory polymers. *J. Mater. Chem.* 2007, 17, 1543–1558
2. Likhachev A.N. Theoretical foundations for creating structures with variable morphological and functional characteristics *Materialy XXIII Mezhdunar.nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"].
3. Fung, YC. *Biomechanics: motion, flow, stress, and growth*. New York: Springer-Verlag; 1990.

© Лихачев А. Н., 2023

УДК 621.396.67

## РАСЧЕТ ПРОДУКТОВ ПАССИВНОЙ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН И ОБЛУЧАТЕЛЕЙ

К. В. Максимова<sup>1,2\*</sup>, В. В. Мочалов<sup>1</sup>, Н. В. Морозов<sup>1</sup>, Е. Н. Головенкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\*E-mail: maksimowakw@iss-reshetnev.ru

*Рассмотрена методика расчета продуктов пассивной интермодуляции приемно-передающей антенны Ku-диапазона*

*Ключевые слова: пассивная интермодуляция, антенна.*

## CALCULATION OF PASSIVE INTERMODULATION PRODUCTS OF TRANSCEIVER ANTENNAS AND FEEDS

K. V. Maksimova<sup>1,2</sup>, V. V. Mochalov<sup>1</sup>, N. V. Morozov<sup>1</sup>, E. N. Golovenkin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University

79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*We reviewed the methodology for calculating the passive intermodulation products of a Ku-band transceiver antenna*

*Keywords: passive intermodulation, antenna.*

В идеальной линейной электрической системе с несколькими несущими частотами, несмотря на возможное линейное искажение уровней мощности, не могут генерироваться никакие дополнительные частоты [1].

Интермодуляционные явления возникают в электрических цепях при нелинейном преобразовании суммы колебаний нескольких частот или одного сигнала со сплошным частотным спектром. В выходной цепи такого узла, кроме искажений в пределах полосы частот входного сигнала, возникают внеполосные мешающие комбинационные составляющие с частотами, которых не было на входе [2].

Наибольшие неприятности причиняют интермодуляции нечетных порядков, так как они располагаются ближе всего к несущим частотам. Интермодуляции 3-го и 5-го порядков составляют примерно 95% всех интермодуляционных помех (рис. 1).

Проблемы с пассивными интермодуляционными искажениями в системах связи возникают в следующих условиях:

- высокая мощность передаваемого сигнала;
- высокая чувствительность приемного устройства;
- наличие нескольких каналов передачи;
- использование одной антенны для приема и передачи сигналов;
- наличие пассивных нелинейных компонентов в линии передачи: кабели, соединители, адаптеры, фильтры, направленные ответвители, антенны [3].

Продукты пассивной интермодуляции ( $F_{n\text{ПИМ}}$ ) двух основных частот  $F_1$  и  $F_2$  могут быть описаны уравнением:

$$F_{n\text{ПИМ}} = m \cdot F_1 \pm n \cdot F_2,$$

где  $m$  и  $n$  – целые числа;  $n_{\text{ПИМ}} = n + m$  – порядок продуктов ПИМ [4].

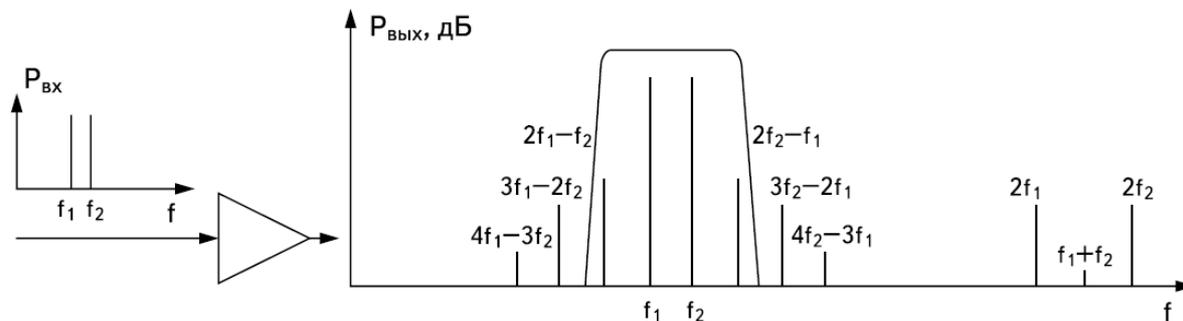


Рис. 1. Интермодуляция в пассивном устройстве с нелинейной характеристикой

Произведем расчет ПИМП на примере прямо-передающей антенны Ку-диапазона для космического аппарата серии «Экспресс». Типовые диапазоны частот 10900 – 12750 МГц на передачу, и 13750 – 14500 МГц на прием. Антенна представляет собой офсетную однозеркальную конструкцию с одиночным облучателем и рефлектором диаметром 2000 мм, который позволяет формировать контурную ДН в пределах заданной территории.

В качестве исходных данных для расчета брались значения несущих частот рабочих диапазонов приема и передачи (табл. 1).

Таблица 1

Несущие частоты рабочих диапазонов приема и передачи

Частоты передачи, МГц											
12604.4	12646.1	12687.8	12729.5	10981.25	11043.75	11106.25	11168.75	11481.25	11543.75	11606.25	11668.75
Частоты приема, МГц											
13750						14500					

Минимальный порядок продуктов ПИМ, которые приводят к максимальному воздействию в приемном диапазоне частот, являются продукты 3, 5 порядков, определяемые как:

- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12604,4 \text{ МГц} - 1 \cdot 10981,25 \text{ МГц} = 14227,55 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12604,4 \text{ МГц} - 1 \cdot 11043,75 \text{ МГц} = 14165,05 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12604,4 \text{ МГц} - 1 \cdot 11106,25 \text{ МГц} = 14102,55 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12604,4 \text{ МГц} - 1 \cdot 11168,75 \text{ МГц} = 14040,05 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12646,1 \text{ МГц} - 1 \cdot 10981,25 \text{ МГц} = 14310,95 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12646,1 \text{ МГц} - 1 \cdot 11043,75 \text{ МГц} = 14248,45 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12646,1 \text{ МГц} - 1 \cdot 11106,25 \text{ МГц} = 14185,95 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12646,1 \text{ МГц} - 1 \cdot 11168,75 \text{ МГц} = 14123,45 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12646,1 \text{ МГц} - 1 \cdot 11481,25 \text{ МГц} = 13810,95 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 10981,25 \text{ МГц} = 14394,35 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 11043,75 \text{ МГц} = 14331,85 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 11106,25 \text{ МГц} = 14269,35 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 11168,75 \text{ МГц} = 14206,85 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 11481,25 \text{ МГц} = 13894,35 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 11543,75 \text{ МГц} = 13831,85 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12687,8 \text{ МГц} - 1 \cdot 11606,25 \text{ МГц} = 13769,35 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 10981,25 \text{ МГц} = 14477,75 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11043,75 \text{ МГц} = 14415,25 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11106,25 \text{ МГц} = 14352,75 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11168,75 \text{ МГц} = 14290,25 \text{ МГц}$
- $n_{\text{ПИМ}}^3 = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11481,25 \text{ МГц} = 13977,75 \text{ МГц}$

$$n_{\text{ПИМ}^3} = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11543,75 \text{ МГц} = 13915,25 \text{ МГц}$$

$$n_{\text{ПИМ}^3} = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11606,25 \text{ МГц} = 13852,75 \text{ МГц}$$

$$n_{\text{ПИМ}^3} = 2 \cdot 12729,5 \text{ МГц} - 1 \cdot 11668,75 \text{ МГц} = 13790,25 \text{ МГц}$$

$$n_{\text{ПИМ}^5} = 3 \cdot 12604,4 \text{ МГц} - 2 \cdot 11668,75 \text{ МГц} = 14475,7 \text{ МГц}$$

Полученные результаты расчета показали, что при разработке и изготовлении антенны необходимо применять технологии и материалы, позволяющие избежать или снизить уровень ПИМП.

### Библиографические ссылки

1. Пассивная интермодуляция и антенны на базе печатных плат // СВЧ электроника. 2017. №1. С. 54–56.
2. Белов Л., Кочемасов В., Строганова Е. Пассивная интермодуляция в СВЧ-цепях: механизмы появления, методы измерения и способы снижения // Элементная база электроники. 2015. №3. С. 80–91.
3. Джуринский К. Интермодуляции в радиочастотных соединителях для мобильной и сотовой связи // Компоненты и технологии. 2010. №6. С. 25–30.
4. Сокращение сроков тестирования пассивной интермодуляции в системах связи нового поколения // Проблемы разработки и тестирования электронных устройств. 2014. С. 2.

### References

1. *Passive intermodulation and printed circuit board antennas* [Microwave electronic]. 2017, №1, p. 54–56. (In Russ.).
2. Belov L., Kochemasov V., Stroganova E. *Passive intermodulation in Microwave circuits: mechanisms of occurrence, measurement methods and methods of reduction* [Electronics element base]. 2015, №3, p. 80–91. (In Russ.).
3. Dzhurinskiy K. *Intermodulation in RF Connectors for Mobile Cellular Communications* [Components and technologies]. 2010, №6, p. 25–30. (In Russ.).
4. *Reduction of testing time for passive intermodulation communication systems* [Problems of developing and testing electronic devices]. 2014, p. 2. (In Russ.).

© Максимова К. В., Мочалов В. В., Морозов Н. В., Головенкин Е. Н., 2023

УДК 629.78:681.2

**КОМПРЕССИОННЫЕ ОТРЫВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНИТЕЛИ  
БЕЗ УСТРОЙСТВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ РАССТЫКОВКИ КОНТАКТОВ  
ДЛЯ РАЗДЕЛЯЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

П. П. Моисеев, А. И. Викторов, В. А. Смирнов, И. И. Нечушкин

ООО «Научно-производственное предприятие «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: astron-el-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрены отрывные электрические соединители, показаны компрессионные отрывные электрические соединители с пружинными контактами без устройства предварительной расстыковки контактов.*

*Ключевые слова: отрывные электрические соединители, пружинные контакты.*

**COMPRESSION TEAR-OFF ELECTRICAL CONNECTORS WITHOUT PRELIMINARY  
DISCONNECTING DEVICES FOR SEPARATED SPACECRAFT STRUCTURES**

P. P. Moiseev, A. I. Viktorov, V. A. Smirnov, I. I. Nechushkin

Scientific-production enterprise «ASTRON ELECTRONICS» Ltd.  
2, Veselaya str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: astron-el-moiseev.pp@yandex.ru

*Detachable electrical connectors are considered, compression detachable electrical connectors with spring contacts without a device for preliminary separation of contacts are shown.*

*Keywords: detachable electrical connectors, spring contacts.*

Для применения в составе разделяемых конструкций космических аппаратов (КА) в [1] были предложены два типа отрывных электрических соединителей (ОЭС) с устройством предварительной расстыковки контактов: разрывного типа с разрываемыми контактами и компрессионного типа с пружинными контактами. Предложенные ОЭС были изготовлены и испытаны. Результаты испытаний показали преимущество компрессионных соединителей перед разрывными [2].

Применение в ОЭС узла предварительной расстыковки контактов приводит к увеличению габаритных размеров и массы изделий, а также к необходимости применения внешних устройств расстыковки, которые управляются отдельными электрическими сигналами. Для уменьшения габаритных размеров, массы и упрощения конструкции КА предлагаются компрессионные ОЭС без узлов предварительной расстыковки контактов.

В конструкции данных соединителей не применяются узлы предварительной расстыковки контактов, а вводятся направляющие, которые позволяют точно соединить разделяемые части соединителя и препятствуют боковым нагрузкам, возникающим на этапе выведения КА на орбиту. За счет установки дополнительных металлических экранов и прокладок из эластичного электропроводящего материала в данных ОЭС обеспечивается лучшее экранирование контактных групп от внешних электромагнитных воздействий.

На рис. 1 показаны компрессионные ОЭС без узлов предварительной расстыковки контактов с 32 и 29 контактами.

В соединителях с 32 и 29 контактами для контроля расстыковки можно использовать по 4 контакта, тогда в этих ОЭС для непосредственного подключения электрических цепей будут задействованы 28 и 25 контактов соответственно.

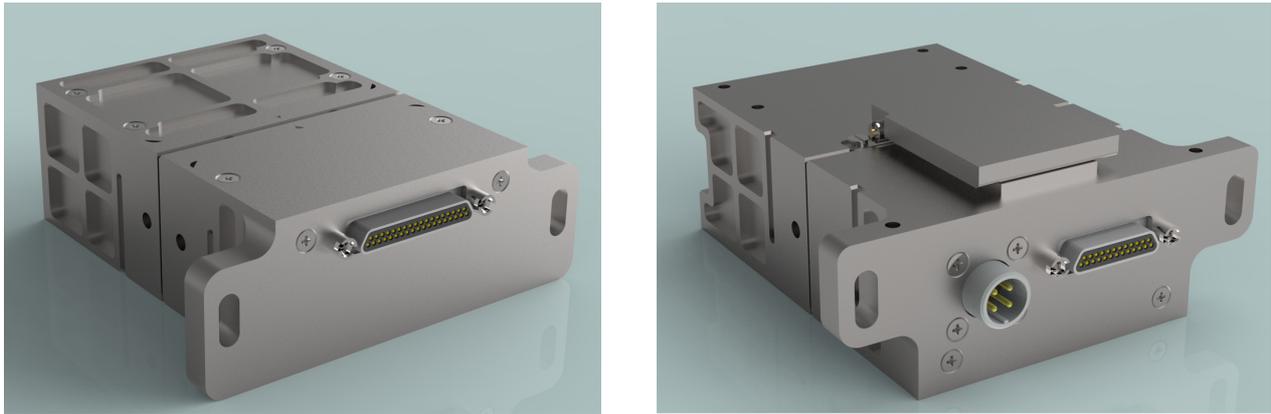


Рис. 1. Внешний вид компрессионных ОЭС без узлов предварительной расстыковки контактов с 32 контактами (слева) и с 29 контактами (справа)

При применении компрессионных ОЭС без узлов предварительной расстыковки контактов необходимо учитывать, что они имеют меньшие габаритные размеры и массу изделий, но требуют обеспечения необходимого усилия для сжатия контактных пар соединителей за счет конструкции КА, а также имеют более высокое механическое воздействие на отделяемую конструкцию КА в момент разделения, чем соединители с узлами предварительной расстыковки контактов.

#### Библиографические ссылки

1. Моисеев П.П., Викторов А.И., Смирнов В. А. и др. Отрывные электрические соединители с устройствами расстыковки для разделяемых конструкций космического аппарата // Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч. конф. посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (10–12 ноября 2021, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Ч. 2. С. 110–111.
2. Моисеев П.П., Викторов А.И., Смирнов В. А. и др. Компрессионные отрывные электрические соединители для разделяемых конструкций космического аппарата // Решетневские чтения: материалы XXVI Междунар. науч. конф. посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–11 ноября 2022, г. Красноярск): в 1 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. Ч. 1. С. 120–121.

#### References

1. Moiseev P. P., Viktorov A. I., Smirnov V. A. et al. Tear-off electrical connectors with decoupling devices for separable spacecraft structures // Reshetnev readings: proceedings of the XXV Intern. scientific conf. dedicated in memory of the general designer of rocket and space systems, academician M.F. Reshetnev (November 10–12, 2021, Krasnoyarsk): at 2 pm / under the general. ed. Yu. Yu. Loginov; Siberian state university M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2021. Part 1, P. 110–111. (In Russ.)
2. Moiseev P. P., Viktorov A. I., Smirnov V. A. et al. Compression tear-off electrical connectors for spacecraft separable structures // Reshetnev readings: proceedings of the XXVI Intern. scientific conf. dedicated in memory of the general designer of rocket and space systems, academician M.F. Reshetnev (November 09–11, 2021, Krasnoyarsk): at 1 pt / under the general. ed. Y. Y. Loginov; Siberian state university M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2022. Part 1, P. 120–121. (In Russ.)

© Моисеев П. П., Викторов А. И., Смирнов В. А., Нечушкин И. И., 2023

УДК 629.78:681.2

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ

П. П. Моисеев, А. И. Викторов, А. М. Сидоров, Е. А. Зенкин

ООО «Научно-производственное предприятие «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрена система контроля разворачивания крупногабаритной трансформируемой антенны космического аппарата. Показана структурная схема системы контроля, описан ее состав.*

*Ключевые слова: контроль разворачивания антенны, датчик силы, видеоконтрольное устройство, беспроводные устройства передачи данных.*

## CONTROL SYSTEM FOR THE DEPLOYMENT OF A LARGE TRANSFORMABLE ANTENNA

P. P. Moiseev, A. I. Viktorov, A. M. Sidorov, E. A. Zenkin

Scientific-production enterprise «ASTRON ELECTRONICS» Ltd.  
2, Veselaya str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*A system for controlling the deployment of a large-sized transformable spacecraft antenna is considered. The block diagram of the control system is shown, its composition is described.*

*Keywords: antenna deployment control, force sensor, video monitoring device, wireless data transmission devices.*

Для обеспечения штатного разворачивания крупногабаритной трансформируемой антенны космического аппарата (КА) из транспортного положения в рабочее положение необходимо обеспечить контроль усилий в шарнирных узлах силовой конструкции антенны и видеоконтроль процесса раскрытия. Это позволит своевременно реагировать на превышение силовых параметров натяжений и оперативно принимать решения для безаварийного раскрытия.

Примером проведения видеоконтроля разворачивания крупногабаритной трансформируемой антенны является КА «ICO-G1» компании Space Systems/Loral (США), на котором 26 апреля 2008 года в течении четырех часов обеспечивался видеоконтроль разворачивания отражателя антенны диаметром двенадцать метров тремя камерами видеосистемы фирмы Ecliptic Enterprises Corporation (США) [1]. Также на КА «Sirius FM-6», запущенном на геостационарную орбиту 25 октября 2013 года, проводился семичасовой видеоконтроль последовательности разворачивания большой основной антенны КА семью камерами видеосистемы той же фирмы [2].

Для решения вышеуказанных задач предлагается в одной системе контроля разворачивания крупногабаритной трансформируемой антенны объединить устройства контроля усилий в шарнирных узлах силовой конструкции антенны и видеоконтроля процесса разворачивания. Учитывая крупные размеры антенны и значительное удаление от КА установленных в шарнирных узлах антенны датчиков силы (ДС), приводящие к большим сложностям применения электрических кабелей, в системе контроля дополнительно предлагается применить беспроводные устройства передачи данных, при этом устройства, установленные на антенне, работают от автономного источника электропитания (АИЭП).

На рис. 1 показана структурная схема системы контроля разворачивания крупногабаритной трансформируемой антенны (СКРА), которая состоит из блока коммутации и передачи информации (БКПИ), двух видеокамер ВК-А и ВК-Б, радиомодема (РМ), радиомодуля датчиков (РМД) и ДС в количестве  $n$  штук. БКПИ устанавливается на КА, подключается к системе электропитания (СЭП) КА и блоку контроля и управления (БКУ) КА, обеспечивая получение бортового электропитания (БЭП), матричных аппаратных сигналов (МАС), мультиплексный канал обмена (МКО) и передачу в БКУ

сигналов датчиков (СД) блока. Также БКПИ подключается к РМ, который устанавливается на несущей штанге антенны. БКПИ передает в РМ электропитание (ЭП) и производит с ним информационный обмен по интерфейсу RS-485. ВК устанавливаются на КА с возможностью обеспечения необходимого ракурса, при этом объективы камер могут иметь разные углы поля зрения. ВК также, как и РМ, получают электропитание от БКПИ и производят с ним информационный обмен по интерфейсу RS-485. РМД устанавливается непосредственно на антенне и кабелями соединяется с ДС. Работу РМД обеспечивает АИЭП. Информационный обмен устройств беспроводной передачи данных производится на частоте 868 МГц [3]. Количество ДС определяется количеством контролируемых шарнирных узлов, а их параметры необходимы рабочими усилиями для штатного развертывания антенны.

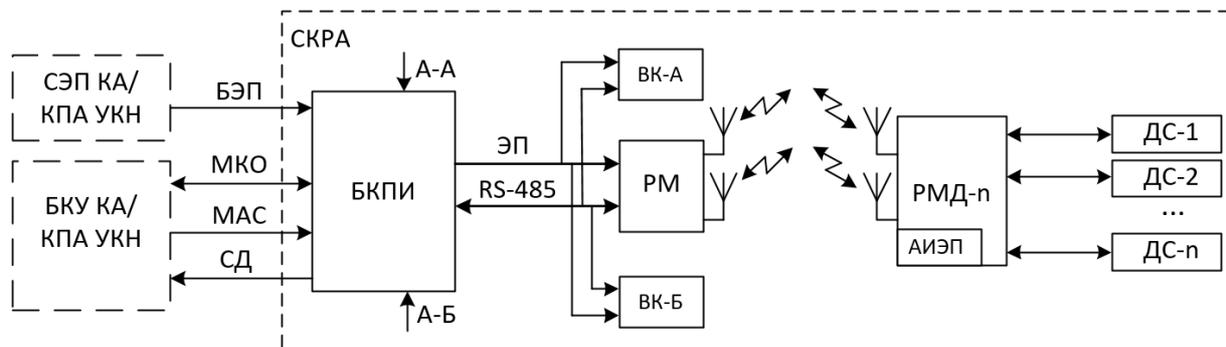


Рис. 1. Структурная схема системы контроля развертывания антенны

Применение показанной СКРА позволяет обеспечить оптимизацию применяемой для контроля аппаратуры, с возможностью дальнейшего расширения задач контроля, а также уменьшить протяженность и массу кабельной сети на антенне, что облегчит процесс развертывания, упростит сборку и наземную отработку антенны.

### Библиографические ссылки

1. Ecliptic Enterprises Corporation предоставляет бортовые видеосистемы для Space Systems/Loral [Электронный ресурс]. URL: <https://spaceref.com/science-and-exploration/ecliptic-enterprises-corporation-provides-on-board-video-systems-to-space-systems-loral/> (дата обращения: 21.08.2023).
2. Ecliptic RocketCam запечатлела развертывание большой антенны на космическом корабле Sirius FM-6 [Электронный ресурс]. URL: <https://spaceref.com/space-commerce/ecliptic-rocketcam-captures-large-antenna-deployment-on-sirius-fm-6-spacecraft> (дата обращения: 21.08.2023).
3. Система контроля положений элементов крупногабаритных конструкций космических аппаратов / П. П. Моисеев, А. И. Викторов, А. М. Сидоров // Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–11 нояб. 2017, г. в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 298-299.

### References

1. Ecliptic Enterprises Corporation Provides On-Board Video Systems to Space Systems/Loral [Electronic resource]. URL: <https://spaceref.com/science-and-exploration/ecliptic-enterprises-corporation-provides-on-board-video-systems-to-space-systems-loral/> (Retrieved 21.08.2023).
2. Ecliptic RocketCam Captures Large Antenna Deployment on Sirius FM-6 Spacecraft [Electronic resource]. URL: <https://spaceref.com/space-commerce/ecliptic-rocketcam-captures-large-antenna-deployment-on-sirius-fm-6-spacecraft> (Retrieved 21.08.2023).
3. System controlling the position of elements of large spacecraft structures / P. P. Moiseev, A. I. Viktorov, A. M. Sidorov // Reshetnev readings: materials of the XXI Anniversary international. scientific-practical Conf. in memory of the general designer of rocket and space systems academician M.F. Reshetnev (Nov. 8–11, 2016, at 2 p.m. / under the general editorship of Yu. Yu. Loginov; Sib. state aerospace university Krasnoyarsk, 2017. Part 1.P. 298-299. (in Russ.).

## РЕФЛЕКТОРЫ С ГИБКИМИ РЕБРАМИ

А. Д. Невзоров<sup>1</sup>, П. Е. Слепцов<sup>1</sup>

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*Построена экспериментально-теоретическая модель гибкого стержня (ребра). Получена зависимость профиля ребра от прилагаемого момента привода развёртывания. Оптимизирован профиль ребра. Изучена взаимосвязь профиля ребра и точности поверхности рефлектора.*

*Ключевые слова: гибкая спица, экспериментально-теоретическая модель, момент привода, оптимизированный профиль, точность поверхности рефлектора.*

## REFLECTORS WITH FLEXIBLE RIBS

A. D. Nevzorov<sup>1</sup>, P. E. Sleptsov<sup>1</sup>

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*An experimental and theoretical model of a flexible rod (rib) is constructed. The dependence between the rib shape and the applied torque of the deployment drive is obtained. The shape of the rib has been optimized. The relationship between the rib shape and the accuracy of the reflector surface is studied.*

*Keywords: flexible spoke, experimental and theoretical model, drive torque, optimized shape, reflector surface accuracy.*

Рефлектор состоит из каркаса, гибких спиц и сетчатой радиоотражающей поверхности, закреплённой на спицах. Спицы шарнирно закреплены на ступице и приводятся в рабочее положение приводом, создающим момент в основании спицы (рис. 1).

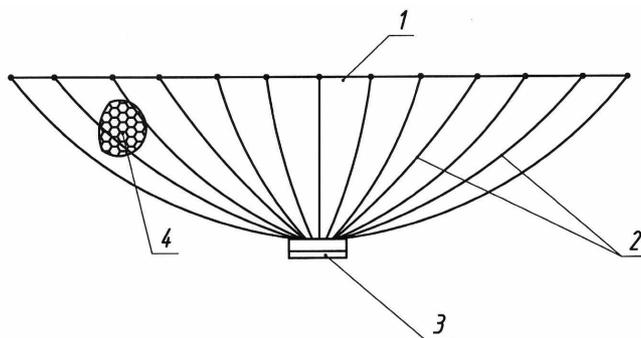


Рис. 1. Рефлектор с гибкими ребрами  
1 – внешний кольцевой контур; 2 – спицы;  
3 – привод; 4 – радиоотражающее сетеполотно

В конце хода развёртывания спицы опираются на внешний кольцевой контур, который задают их положение концов в пространстве. При дальнейшем движении момент создаёт в спице изгибающее усилие, который формирует криволинейный профиль (рис. 2).

Для расчёта профиля спицы в зависимости от момента используется аналитическая модель, используемая в теории сопротивления материалов [1]. С учетом граничных условий уравнение для расчета профиля спицы в осях  $O^*x^*z^*$ , связанных с недеформированным стержнем имеет вид:

$$z^* = -\frac{M}{6EJL} (x^{*3} - 3Lx^{*2} + 2L^2x^*)$$

По этой формуле были проведены расчёты для спиц рефлектора размером 2,5 метра с числом спиц 12, с фокусным расстоянием 1,1 м, который сравнительно просто моделировать. Для подтверждения результатов аналитических расчетов была создана экспериментальная установка экспериментальная установка (рис. 3).

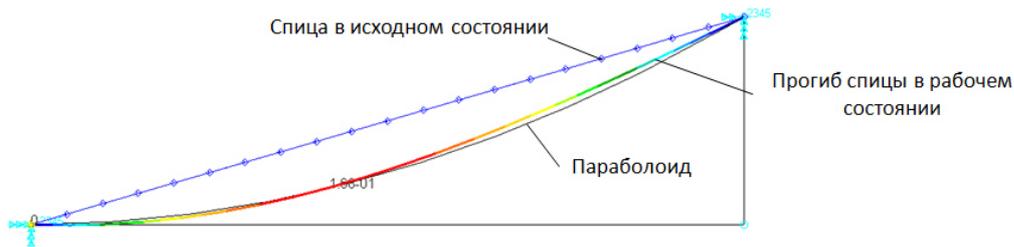


Рис. 2. Изгиб спицы под воздействием момента рычага

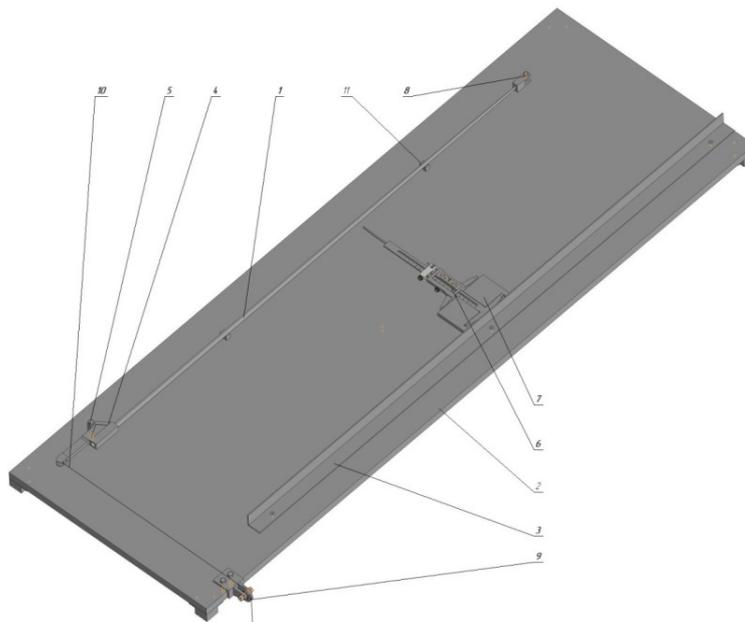


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения профиля изгиба стержня  
 1 – гибкая спица; 2 – рабочая поверхность; 3 – направляющая для штангенциркуля;  
 4 – рычаг; 5 – шарнир; 6 – штангенциркуль; 7 – фиксатор для штангенциркуля;  
 8 – вильчатый шарнир; 9 – ролик; 10 – трос; 11 – упор для штангенциркуля

В результате проведенных экспериментов была получена серия зависимостей профилей стержня от приложенного момента, которые совпали с расчётными данными. Для стержня размером 10X0,3 мм постоянного сечения СКО от параболоида при оптимальном моменте 4 Н\*м составило 15 мм, что показало непригодность стержней постоянного сечения для спиц рефлекторов.

Анализ возможностей увеличения точности гибких спиц показал, что выход нужно искать в профилировании их жёсткости по длине. Проведённые расчёты показали возможность уменьшения минимального значения отклонения до 8,8 мм для указанного стержня.

Оптимальная форма стержня в виде усечённого «копья» для мембранной поверхности рефлектора была получена с использованием выражения [2]:

$$K - K_{нач} = \frac{M}{H};$$

где  $H = E \cdot J$  – жесткость;  $E$  – модуль упругости в сечении стержня;  $J$  – момент инерции в сечении стержня;  $M$  – внутренний изгибающий момент в данном сечении стержня;  $K_{нач}$  – кривизна начального состояния недеформированного стержня;  $K$  – кривизна упругодеформированного стержня.

#### Библиографические ссылки

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
2. Н.М.Фейзулла, В.А.Пантелеев, Ю.А.Чалова и др. Мобильная экспедиционная складная антенна для связи и приема информации // Радиотехнические тетради, № 26, 2003, стр. 39-45.

#### References

1. Feodosyev V.I. The theory of strength of materials. Textbook for universities. 10th pub., edited. Moscow, BMSTU publ., 1999, 592 p.
2. Feyzulla N. M., Panteleev V.A., Chalova Yu. A., et al. Mobile expeditionary deployable antenna for communication and data accessing. // Radiotekhnicheskie tetradi, N 26, 2003, p. 39-45.

© Невзоров А. Д., Слепцов П. Е., 2023

УДК:629.78.015

## К ВОПРОСУ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

А. С. Орлов, С. А. Орлов, А. В. Пасько

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

*В докладе рассматриваются вопросы испытаний крупногабаритных пространственных конструкций и бортовой аппаратуры на ударные воздействия высокой интенсивности по методу ударных спектров ускорений, обсуждается возможность уменьшения количества ударных воздействий за счет создания симметричных ударных спектров.*

*Ключевые слова: испытания, удар, ударный спектр, крупногабаритные конструкции.*

## ON TESTING THE LARGE SPATIAL STRUCTURES FOR HIGH INTENSITY IMPACT

A. S. Orlov, S. A. Orlov, A. V. Pasko

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

*It is discussed the points of testing large-sized spatial structures and on-board equipment for high-intensity shocks using the shock acceleration spectra method and discussed the possibility of reducing the number of shocks by creating symmetrical shock spectra.*

*Keywords: tests, impact, shock spectrum, large-sized structures.*

На сегодняшний день испытания на ударные воздействия высокой интенсивности (особенно крупногабаритных пространственных конструкций) остаются одними из наиболее сложных видов испытаний на механические воздействия элементов конструкций и оборудования космических аппаратов. Стандартные требования по ударным нагрузкам объекта испытаний формулируются так: «Ударные нагрузки задаются в виде трех ударов по каждому направлению вдоль каждой из трех взаимно перпендикулярных осей (18 ударов)». А сами ударные воздействия представляются либо в виде одиночных импульсов, либо в виде ударного спектра ускорений (УСУ). При этом амплитудные уровни по ударным спектрам ускорений могут составлять несколько тысяч «g» [1-3].

Для создания ударных воздействий существует достаточно разнообразный набор средств: всевозможные гидравлические, механические, пиротехнические стенды и т. д. [4]. При этом чаще всего воспроизводятся простейшие сигналы [5]. Как и одиночный импульс, ударный спектр ускорений (от одиночного импульса) реализуется в одном направлении. Для создания ударных воздействий по различным направлениям осей (в положительном и отрицательном направлениях), как правило, объект испытаний поворачивают на 180 градусов относительно источника ударного воздействия (бойка маятникового стенда, направления падения стола и т. д.). Для реализации такого подхода часто приходится разрабатывать сложную и дорогую оснастку даже при испытаниях достаточно простого оборудования. Наибольшие проблемы возникают при создании ударных воздействий в двух направлениях перпендикулярно плоскости крепления оборудования на маятниковых стендах и в плоскости крепления для стендов с падающими столами.

Для испытаний крупногабаритных пространственных конструкций на ударные воздействия высокой интенсивности разработка такой оснастки может оказаться значительно дороже самого объекта испытаний. Вместе с тем отклик на ударное воздействие всегда получается в виде нестационарной вибрации, затухающей в течение нескольких миллисекунд [4-6]. При получении необходимого УСУ

с помощью одиночного импульса амплитуда ускорений существенно возрастает по сравнению с нестационарной вибрацией, имеющей близкий ударный спектр (в 3-4 раза) [6]. Выход из создавшейся ситуации может быть найден в создании за счет нестационарной вибрации симметричного УСУ (в пределах допустимой погрешности) вдоль одной оси [7]. Или одновременно по каждому направлению вдоль каждой из трех взаимно перпендикулярных осей [8].

Следует также отметить, что формирование требуемого УСУ для испытаний проводят в несколько этапов, т.к. сразу получить необходимый УСУ не удастся. Применение различных источников ударных воздействий, изменение точек приложения этих воздействий, различных крешеров и т. д. позволяет подобрать нужное воздействие. Поэтому отработку нужного режима испытаний проводят на динамическом макете оборудования, и только после формирования необходимого режима испытаний переходят к испытаниям штатного. При создании ударных воздействий высокой интенсивности (свыше 1000g по ударному спектру ускорений) приоритетными средствами создания требуемого воздействия, как правило, являются пиротехнические устройства. Такой подход позволяет сократить необходимое количество ударных воздействий в 2-6раз.

В докладе приводятся примеры реализации данного подхода для различных конструкций (рефлектора антенн, приборы и оборудование КА).

### Библиографические ссылки

1. Орлов С.А., Копытов В.И. Нормирование и отработка бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические воздействия. // Вестник СибГАУ. Вып.№1(47): Издательство СибГАУ, Красноярск, -. 2013. С.125–129.
2. Гладкий В.Ф. Динамика конструкции летательного аппарата М., Наука 1975- 456с.
3. Орлов С.А. Разработка методик нормирования и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические нагрузки участка выведения.// Научный вестник НГТУ. Вып.№3(44):Издательство НГТУ, Новосибирск,-2011.С.137-148.
4. S.A. Orlov, K.A. Matveev and G.I. Rastorguev Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131.
5. Вибрации в технике, справочник в 6 томах. Том 5. Измерения и испытания под редакцией М.Д.Генкина М. Машиностроение 1981-496с.
6. ECSS-E-HB-32-26A. Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook, 19February, 2013 636р.
7. Пат. №2745342 РФ, МПК G01M 7/08.Орлов С.А., Орлов А.С. Способ испытаний на высокоинтенсивные ударные воздействия приборов и оборудования. Оpubл.24. 03.2021 -12с.
8. Пат. №27924872 РФ, МПК G01M 7/00.Орлов С.А., Орлов А.С. Способ испытаний на высокоинтенсивные ударные воздействия приборов и оборудования. Оpubл.25. 04.2023 -18с.

### References

1. Orlov S.A., Kopytov V.I. Rationing and testing of spacecraft onboard equipment for mechanical impacts. // Vestnik SibGAU. Issue No. 1 (47): SibGAU Publishing House, Krasnoyarsk, -. 2013. P.125–129.
2. Smooth V.F. Aircraft design dynamics., Nauka Publisher, Moscow (1975), pp.456
3. Orlov S.A. Development of methods for standardization and testing of spacecraft onboard equipment for mechanical loads of the launch site.// Scientific Bulletin of NSTU. Issue No. 3 (44): NGTU Publishing House, Novosibirsk, -2011. P. 137-148.
4. S.A. Orlov, K.A. Matveev and G.I. Rastorguev Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131.
5. Six-Volume Book of Reference on Vibration in Technology., Vol. 5., Measurements and Tests, edited by M.D. Genkin, Mashinostroenie Publisher, Moscow (1981), pp. 496.
6. ECSS-E-HB-32-26A. space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook, February 19, 2013 636р.
7. Pat. No. 2745342 RF, IPC G01M 7/08. Orlov S.A., Orlov A.S. Test method for high-intensity shock effects of instruments and equipment. Published 25. 03.2021 -12s.
8. Pat. No. 27924872 RF, IPC G01M 7/00. Orlov S.A., Orlov A.S. Test method for high-intensity shock effects of instruments and equipment. Published 25. 04.2023 -18s.

УДК 629.78

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ МАССЫ УГЛЕПЛАСТИКА В ВАКУУМЕ

В. В. Перевозчикова<sup>1,2\*</sup>, И. В. Башков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, Красноярск, Свободный пр., 79

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: veronika.perevozchikova2016@mail.ru

*Представлены результаты исследования потери массы из-за газовой выделенности материалов, используемых в космических аппаратах.*

*Ключевые слова: углепластик, газовыделение, масса, космический аппарат.*

## RESEARCH OF THE WEIGHT LOSS OF CFRP IN VACUUM

V. V. Perevozchikova<sup>1,2\*</sup>, I. V. Bashkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»

52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\*E-mail: veronika.perevozchikova2016@mail.ru

*The results of a study of mass loss due to outgassing of materials used in spacecraft are presented.*

*Keywords: carbon fiber reinforced plastic, gas release, mass, spacecraft.*

Одной из основных проблем увеличения сроков активного существования космических аппаратов (КА) является проблема выбора конструкционных материалов. При выборе конструкционных материалов необходимо учитывать параметры газовой выделенности и сублимации данных материалов при тепловвакуумном и ультрафиолетовом воздействии [1–5]. Выделившиеся из материалов частицы образуют вокруг КА газопылевое облако, называемое собственной внешней атмосферой (СВА). Продукты газовой выделенности состоят из соединений с большой молекулярной массой и низким давлением насыщенных паров. При конденсации загрязняющих продуктов на внешних поверхностях КА образуются пленки, снижающие терморрадиационные и оптические характеристики их критических элементов, например, солнцезащитных экранов, защитных стекол, фотогенерирующих частей солнечных батарей, чувствительных элементов оптико-электронной и оптической бортовой аппаратуры, терморегулирующих покрытий радиаторов системы терморегулирования.

Преимущественное применение в конструкции КА композиционных материалов на основе углепластиков повысило актуальность проблем потери массы из-за газовой выделенности в вакууме, поскольку углепластики содержат полимерную матрицу, которая имеет собственные параметры газовой выделенности, а также при изготовлении и наземной эксплуатации насыщается влагой из атмосферы. Ограниченная информация по газовой выделенности отечественных композиционных материалов создает трудности по созданию КА с длительным САС (срок активного существования) 10 и более лет.

Известные исследования дают разрозненную информацию по проблемам газовой выделенности и сублимации отечественных углепластиков, например:

- в работе [1] приведены результаты эксперимента по газовой выделенности композита, которые показали, что наилучшие результаты (наименьшую потерю массы) продемонстрировали композиты из чистого полистирола и материалы, наполненные корундом;

- в статье [2] приведены измерения влагопоглощения углепластика при помощи весов высокой точности;
- в статье [3] дана оценка газовой выделения полимерного композита, с потерей массы, не превышающей 1%.

На основе данных представленных в вышеописанных работах можно установить рекомендуемые режимы хранения изделий с применением углепластиков, а также проводить отбор материалов с пониженными значениями параметров газовой выделения.

Результатом настоящего исследования является обобщение, систематизация и разработка рекомендаций по подбору отечественных композиционных материалов, позволяющих минимизировать потерю массы из-за газовой выделения в вакууме, а также повышение эффективности использования процессов обезгаживания таких материалов.

### Библиографические ссылки

1. Черкашина Н.И., Сухорослова В.В. Исследование кинетики газовой выделения полимерных композитов при вакуумно-тепловом и ультрафиолетовом воздействии. URL: [http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s12/12\\_14.pdf](http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s12/12_14.pdf) (дата обращения 13.09.2023).
2. Башков И.В., Двирный В.В., Миронович В.В. и др. Экспериментальное исследование влагопоглощения углепластика марки М55J, применяемого в КА // Решетневские чтения. 2013. С. 399–400.
3. Сидельников Р.В., Черкашина Н.И. Оценка газовой выделения полимерного композита с кристаллическим SiO<sub>2</sub> в условиях глубокого вакуума // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. 2018. С. 86.
4. Семкин Н.Д. Газопылевая атмосфера космических аппаратов и электронные средства ее контроля. Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. 252 с.
5. Крючек С.Д. Обеспечение требования газовой выделения материалов для применения в изделиях космического назначения // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 133–134.

### References

1. Cherkashina N.I., Sukhoroslova V.V. Study of the kinetics of gas release of polymer composites under vacuum-thermal and ultraviolet exposure. Available at: [http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s12/12\\_14.pdf](http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s12/12_14.pdf) (accessed 13.09.2023).
2. Bashkov I.V., Dvirny V.V., Mironovich V.V. et al. [Experimental study of moisture absorption of M55J carbon fiber plastic used in spacecraft]. *Reshetnev Readings*. 2013. P. 399–400 (In Russ.).
3. Sidelnikov R.V., Cherkashina N.I. [Assessment of gas release of a polymer composite with crystalline SiO<sub>2</sub> under high vacuum conditions]. *New materials, equipment and technologies in industry*. 2018. P. 86 (In Russ.).
4. Semkin N.D. *Gazopylevaya atmosfera kosmicheskikh apparatov i elektronnyye sredstva yeye kontrolya* [Gas and dust atmosphere of spacecraft and electronic means of its control]. Samara: Samara University Publishing House, 2016. 252 p.
5. Kryuchek S.D. [Ensuring the requirements for gas release of materials for use in space products]. *Reshetnev Readings*. 2017. V. 1. P. 133–134 (In Russ.).

© Перевозчикова В. В., Башков И. В., 2023

УДК 520.6.07

## ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СОБСТВЕННОЙ ВНЕШНЕЙ АТМОСФЕРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Н. В. Ракитина<sup>1,2\*</sup>, Р. Н. Борисов<sup>1</sup>, Э. П. Кожокар<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
\*E-mail: Rakitina-nv@yandex.ru

*В данной работе описана важность контроля значений давления собственной внешней атмосферы космического аппарата. Приведены данные показателей датчиков давления внутри приборного отсека с момента пуска космического аппарата за сутки.*

*Ключевые слова: космический аппарат, собственная внешняя атмосфера, высоковольтная бортовая аппаратура, датчики измерения давления.*

## USE OF MEANS TO CONTROL THE SPACECRAFT'S OWN EXTERNAL ATMOSPHERE

N. V. Rakitina<sup>1,2\*</sup>, R. N. Borisov<sup>1</sup>, E. P. Kozhokar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
<sup>2</sup> Siberian State University  
79, Svobodnyj prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*E-mail: Rakitina-nv@yandex.ru

*This work describes the importance of monitoring pressure values the spacecraft's own external atmosphere. The data on the indicators of pressure sensors inside the instrument compartment from the moment of launch of the spacecraft per day is presented.*

*Keywords: spacecraft, own external atmosphere, high-voltage on-board equipment, pressure sensors.*

В процессе лётной эксплуатации космический аппарат (КА) подвергается воздействию широкого спектра факторов космического пространства и факторов техногенного характера: ионизирующее излучение космического пространства (ИИКП), потоков плазмы стационарных плазменных двигателей (СПД), потоков микрометеоритов, внешней помеховой обстановке, собственной внешней атмосферы [1].

Одним из факторов, влияющих на нормальное функционирование КА, является собственная внешняя атмосфера. Собственной внешней атмосферой КА называют газовую среду, формирующуюся за счет процессов газовой выделенности и сублимации материалов конструкции КА, утечки газов из внутренних отсеков и работы различного оборудования КА [2].

Одним из последствий влияния СВА на работоспособность КА является создаваемое повышенное давление внешней среды в районе установки высоковольтной бортовой аппаратуры, для которой в соответствии с конструкторской документацией установлена необходимость работы только в условиях пониженного давления внешней среды. Функционирование высоковольтного оборудования в условиях превышения заданных уровней давления внешней среды может привести к возникновению электрического пробоя на корпус изделия, что в свою очередь приводит к потере работоспособности,

как самого высоковольтного оборудования, так и другого оборудования, функционирующего в составе КА [3-4].

Для того чтобы избежать ситуаций возникновения электрического пробоя на оборудовании КА необходимо измерять и контролировать значение давления собственной внешней атмосферы КА, как перед включением высоковольтного оборудования, так и во время его работы. А в случае превышения давления СВА КА отключать чувствительное высоковольтное оборудование.

Для измерения давления СВА, как внутри негерметичного приборного отсека, так и снаружи, в КА производства АО «РЕШЕТНЕВ» были установлены датчики измерения давления. Устанавливаемые датчики измеряют давление внутри и снаружи КА с момента его пуска с космодрома и на протяжении дальнейшей эксплуатации КА в космическом пространстве.

На рис. 1 приведены данные измерений давления внутри приборного отсека одного из КА производства АО «РЕШЕТНЕВ».

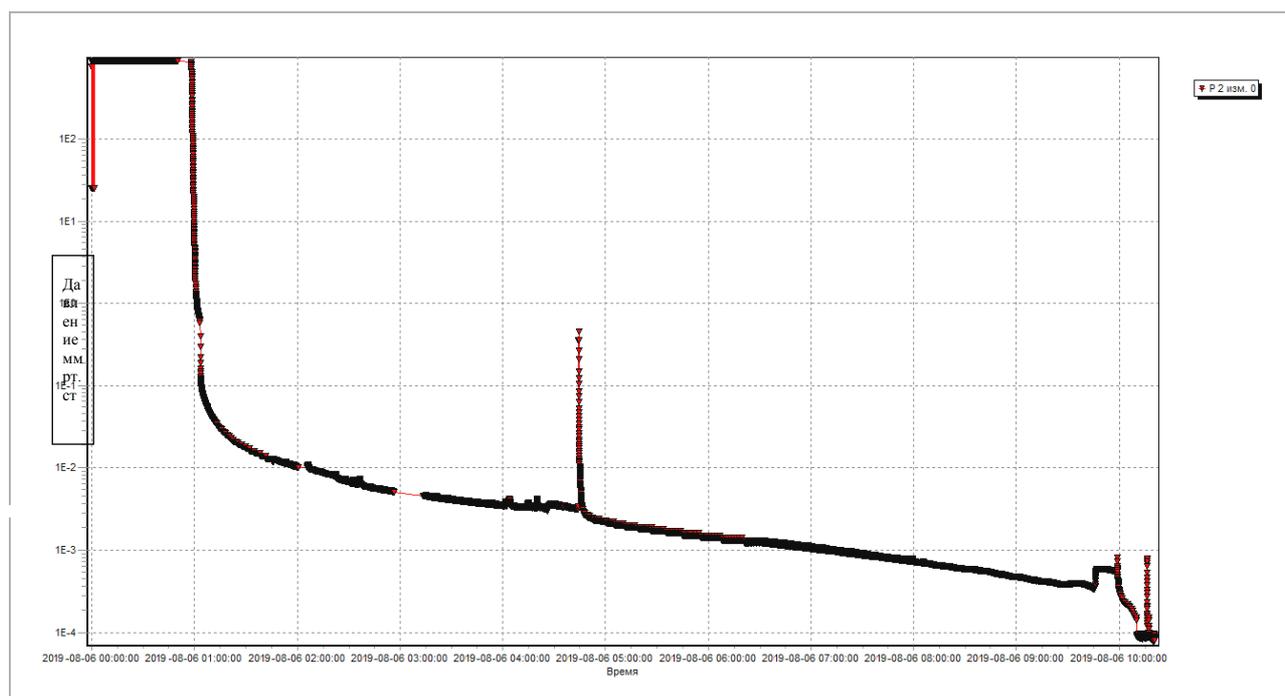


Рис. 1. Измерение давления внутри приборного отсека КА с момента пуска за сутки

Как видно из представленного рисунка для собственной внешней атмосферы КА характерно не только постепенное снижение давления, но также временное изменение динамики снижения, а также периодические всплески и возрастания давления. Это связано, прежде всего, с работой бортового оборудования и механических систем космического аппарата и его ракетносителя, а также с текущим температурным режимом систем КА.

Таким образом, постоянный контроль собственной внешней атмосферы космического аппарата во время его эксплуатации в космическом пространстве, при помощи установленных на него датчиков давления, обеспечивает возможность принятия оперативных решений по управлению космическими аппаратом с целью предотвращения возможных поражающих воздействий, влияющих на работоспособность КА. То есть повышается стойкость и надежность КА.

#### Библиографические ссылки

1. Тестоедов Н.А., Кочура С.Г., Максимов И.А. Система мониторинга уровней воздействия космической среды на космические аппараты разработки АО «Информационные спутниковые системы» // Вестник СибГАУ 2015. Т.16, №4. С. 849-856.
2. Моделирование процессов формирования СВА и загрязнения поверхности КА / Надирадзе А.Б., Шапошников В.В., Хартов В.В. и др. // Модель Космоса. 2007. Изд 8. Том 8. С. 132.

3. Новиков Л.С., Воронина Е.Н., Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой: монография. М.: Издательство «КДУ», «Университетская книга», 2021. 560 с.

4. Максимов И.А, Кочура С.Г., Тестоедов Н.А. Влияние космической среды на космические аппараты: учеб. пособие СибГУ им. М. Ф. Решетнева: АО «ИСС». Красноярск, 2022. -39 с.

#### References

1. Testoedov N.A., Kochura S.G., Maksimov I.A. *Sistema monitoringa urovnej vozdejstviya kosmicheskoy sredy na kosmicheskie apparaty razrabotki AO «Informacionnye sputnikovye sistemy»*. [System for monitoring the levels of impact of space environment on spacecraft developed by JSC “Information satellite systems”]. 2015, Vestnik SibGAU, 849-856 p.

2. Nadiradze A.B., Shaposhnikov V.V., Khartov V.V., Maksimov I.A., Ivanov V.V., Smirnov V.A. *Modelirovanie protsessov formirovaniya SVA i zagryazneniya poverkhnosti KA*. [Simulation of the formation of the NEA, and surface contamination of spacecraft]. 2007, Model' Kosmosa, Vol. 8, 132 p.

3. Novikov L.S., Voronina E. N. *Vzaimodejstvie kosmicheskikh apparatov s okruzhayushchej sredoj*. [Interaction of spacecraft with the environment: monograph]. 2021, Universitetskaya kniga, 560 p.

4. Maksimov I.A., Kochura S.G., Testoedov N.A. *Vliyanie kosmicheskoy sredy na kosmicheskie apparaty* [Influence of the space environment on spacecraft]. 2022, SibGU im M. F. Reshetneva: AO ISS, 39 p.

© Ракитина Н. В., Борисов Р. Н., Кожокаръ Э. П., 2023

УДК 629.78

## **АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСФОРМАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

Е. А. Рожкова, А. В. Кустов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: e\_rozhok@vk.com

*В данной статье рассматривается разработка автономных систем управления. В работе представлены различные методы и подходы к созданию таких систем, а также приведены примеры исследований и практических реализаций.*

*Ключевые слова: автоматизированные системы управления, космические аппараты, трансформация, алгоритмы, крупногабаритные конструкции.*

## **ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS CONTROL SYSTEMS FOR THE TRANSFORMATION OF LARGE STRUCTURES IN SPACE VEHICLES**

E. A. Rozhkova, A. V. Kustov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: e\_rozhok@vk.com

*This article discusses the development of autonomous control systems. The paper presents various methods and approaches to creating such systems, as well as provides examples of research and practical implementations.*

*Keywords: automated control systems, spacecraft, transformation, algorithms, large-scale structures.*

Трансформация крупногабаритных конструкций в космических аппаратах является важным и сложным заданием. Это связано с необходимостью изменения формы и конфигурации аппарата для выполнения различных миссий и задач. Для эффективного выполнения таких заданий требуются автономные системы управления, которые будут отслеживать и контролировать процесс трансформации.

Разработка автономных систем управления (АСУ) становится все более важной в современных космических аппаратах, особенно в случае трансформации крупногабаритных конструкций. Множество примеров из жизни показывают, как АСУ способны значительно улучшить функциональность и эффективность таких систем. Компания "АО ИСС" является одним из ведущих разработчиков АСУ в России и активно работает над применением этой технологии в космических проектах.

Одним из важнейших условий развития является переход на автоматизированное управление, суть которого заключается в разработке и внедрении во все звенья организационных структур информационных и телекоммуникационных технологий. В области производства космической техники имеет место сложная отраслевая специфика. Необходимо учитывать множество факторов. [1]

Один из методов и подходов к разработке автономных систем управления для трансформации крупногабаритных конструкций – метод искусственного интеллекта. С помощью алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей можно создать системы, которые могут самостоятельно анализировать и принимать решения о трансформации аппарата в реальном времени.

Еще одним подходом является использование системы датчиков и контроля. Система датчиков будет отслеживать все изменения в конструкции аппарата и передавать эти данные системе управ-

ления. Таким образом, система сможет реагировать на изменения и регулировать процесс трансформации.

Исследования показывают эффективность и надежность автономных систем управления в процессе трансформации крупногабаритных конструкций. Практические реализации демонстрируют возможность применения таких систем в реальных условиях и их успешную работу.

Один из примеров разработки автономных систем управления для трансформации крупногабаритных конструкций в космических аппаратах. Одним из наиболее иллюстративных примеров – это Международная космическая станция (МКС). На МКС применяются различные автономные системы управления для сборки, обслуживания и модификации станции.

Еще одним примером является космический аппарат «SpaceX Dragon 2», который разработан для автономного пилотирования и транспортировки грузов и людей в космос [2]. Эта система управления обладает возможностью трансформации от запуска космического аппарата к его автономному функционированию в космосе.

Кроме того, существуют исследования и разработки автономных роботизированных систем для трансформации и обслуживания космических аппаратов в условиях микрогравитации. Эти роботы могут выполнять сложные задачи по сборке или ремонту космических аппаратов без участия человека, оптимизируя время и ресурсы, например современные трансформируемые рефлекторы для космических аппаратов [3].

Одним из наиболее иллюстративных примеров применения АСУ в космических аппаратах является разработка и использование роботической руки на Международной космической станции (МКС). Роботическая рука, известная как «Кандар», способна выполнять различные операции, такие как сборка, обслуживание и ремонт космического оборудования. Автономные системы управления позволяют роботу Кандару работать в условиях отсутствия прямого контроля со стороны космонавтов, что является важным фактором при выполнении сложных задач.

Анализ требующих роботизации перспективных задач и поиск путей их решения целесообразно проводить с учетом необходимости технологической преемственности при создании новых средств космической робототехники и подтвержденной опытом эффективности долговременной стратегии при отработке соответствующих технологий. [4]

Кроме того, АО ИСС работает над созданием автономных систем управления для космических аппаратов, способных трансформироваться во время полета. Например, космические антенны и зеркала телескопов могут быть развернуты и отрегулированы после запуска на орбиту. Автономные системы управления позволяют точно контролировать этот процесс и обеспечивать оптимальное положение и ориентацию крупногабаритных конструкций для максимального качества получаемого сигнала или изображения.

Разработка АСУ для таких систем представляет собой сложную задачу, требующую сочетания механической, электронной и программной инженерии. Она также включает в себя разработку и тестирование алгоритмов и протоколов коммуникации.

Экспериментальный модальный анализ крупногабаритных трансформируемых космических конструкций связан с рядом проблем: большие габариты и сложная пространственная конфигурация конструкций требуют испытательные лаборатории соответствующих размеров; для развёртывания таких конструкций в поле сил тяжести необходимы специальные поддерживающие устройства; низкие собственные частоты колебаний затрудняют использование датчиков ускорений и являются причиной значительного влияния воздушной среды на определяемые модальные характеристики. [5]

Компания "АО ИСС" имеет богатый опыт в области разработки и внедрения АСУ для космических аппаратов. Ее инженеры и ученые активно сотрудничают с другими научными и промышленными организациями в России и за рубежом, чтобы обмениваться опытом и создавать новые инновационные решения.

Разработка автономных систем управления для трансформации крупногабаритных конструкций требует комплексного подхода. Важно учитывать особенности конструкции, требования и условия работы, а также уровень автономности и надежности системы. Необходимо провести анализ задачи, разработать алгоритмы и модели управления, провести испытания и оптимизацию системы.

### Библиографические ссылки

1. Милов А.В., Попова Ю.П. Разработка автоматизированной системы управления производством на АО «Информационные спутниковые системы» // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. №12.

2. Ризаев А.А., Сарсенбаев Д.Ж. Обзор современных космических кораблей и их сравнительные оценки // Теория и практика современной науки. 2022. №6 (84).
3. Концепция крупногабаритных трансформируемых конструкций для космических аппаратов / Н. А. Тестоедов, В. В. Двирный, В. И. Халиманович [и др.] // Решетневские чтения. 2009. Т. 1. С. 78-80.
4. Белоножко П. П. Космическая робототехника для монтажа и сервиса. Потенциальные задачи, концепции перспективных систем // ВКС. 2019. №2 (99).
5. Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых конструкций / Л. Б. Кочин, С. А. Матвеев, А. И. Тишков [и др.] // Решетневские чтения. 2019. Т. 1. С. 117-118.

### References

1. Milov A.V., Popova Yu.P. Development of an automated production control system at JSC "Information satellite systems" // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2016. P. 12.
2. Rizaev A.A., Sarsenbaev D.Zh. Review of modern spacecraft and their comparative assessments // Theory and practice of modern science. 2022. №6 (84).
3. The concept of large-sized transformable structures for spacecraft / N. A. Testoedov, V. V. Dvirny, V. I. Khalimanovich [et al.] // Reshetnevskiye readings. 2009. T. 1. P. 78-80.
4. Belonozhko P. P. Space robotics for installation and service. Potential tasks, concepts of advanced systems // VKS. 2019. №2 (99).
5. Kochin L. B., Matveev S. A., Tishkov A. I. [et al.] Development of a wireless control system for the shape of large-sized transformable structures // Reshetnevskiye readings. 2019. T. 1. P. 117-118.

© Рожкова Е. А., Кустов А. В., 2023

УДК 539.3

## ИМИТАЦИЯ НЕВЕСОМОСТИ БАЛОК, ПОДВЕШЕННЫХ НА ТРОСАХ

Р. А. Сабиров, Е. Н. Фисенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: rashidsab@mail.ru

*Имитация невесомости означает обнуление или уменьшение какого-либо выбранного силового фактора (например, реакции опоры или момента), и кинематического фактора (прогиба или угла поворота). Подобраны усилия в тросах такими, чтобы сумма квадратов прогибов в точках упругой линии балки была минимальной.*

*Ключевые слова: прогибы балок, метод начальных параметров, нелинейное программирование, регулирование прогибов и внутренних сил, обезвешивание балок.*

## SIMULATION OF WEIGHTLESSNESS OF A BEAMS SUSPENDED ON CABLES

R. A. Sabirov, E. N. Fisenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: rashidsab@mail.ru

*Imitation of weightlessness means zeroing or reducing any selected force factor (for example, the reaction of the support or the moment), and the kinematic factor (deflection or angle of rotation). The forces in the cables are selected so that the sum of the squares of the deflections at the points of the elastic line of the beam is minimal.*

*Keywords: deflections of beams, method of initial parameters, nonlinear programming, regulation of deflections and internal forces, suspension of beams.*

**Введение.** Проблема оптимального и рационального проектирования конструкций актуальна в авиационной и аэрокосмической технике. Обзор, классификация и конструкторский анализ солнечных батарей космических аппаратов рассмотрен в [1]. Разработка современных гибких каркасов солнечных батарей приведена в [2]. В [3] рассматриваются динамические аспекты систем обезвешивания крупногабаритных трансформируемых элементов космических аппаратов при раскрытии.

Рассматривается задача регулирования напряжений, деформаций и прогибов дополнительным натяжением определенных частей конструкций, в частности, растяжением тросами. Регуляторами будут являться усилия натяжения тросов; величины которых следует определить из условия, что сумма квадратов прогибов упругой линии балок была минимальной. Задача приводится к задаче нелинейного программирования.

Анализируются линейно-деформируемые системы. Тросы имеют бесконечно большую жесткость на растяжение. Упругая линия балки содержит бесконечное множество точек, поэтому подвергается анализу дискретная задача с конечным числом точек на упругой линии. Задача нелинейного программирования имеет локальные минимумы. Выполняется проверка на наличие единственного оптимального плана, в зависимости от выбора переменных, вводимых в базис.

**Формулировка задачи.** Рассмотрим на рис. 1 многопролетную балку, состоящую из трех балок общей длины  $L$ , как геометрически изменяемую систему. На балку действуют активные сосредоточенные силы  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , распределенные нагрузки  $q_1, q_2, \dots, q_k$ , момент  $M_A$ . Для уравнивания этих нагрузок приложим силы обезвешивания  $N_1, N_2, \dots, N_S$ , обеспечивающие равновесие системы. Если количество дополнительных сил  $N_1, N_2, \dots, N_S$  меньше числа степеней свободы балки, тогда

балка остается геометрически изменяемой системой. Если количество дополнительных сил  $N_1, N_2, \dots, N_S$  равно числу степеней свободы балки, тогда силы вычисляются из уравнений равновесия (полагаем, что силы расставлены правильно) – в этом случае оптимизировать нечего, равновесие балки и равновесие ее частей выполняется. Если количество дополнительных сил  $N_1, N_2, \dots, N_S$  больше числа степеней свободы балки, тогда можно варьировать силами. Задача моделирования деформирования подвешенных на тросах балок с условием минимизации суммы квадратов ее прогибов варьированием сил натяжения, приводит к задаче нелинейного программирования [4].

Составим целевую функцию  $F$ , которую выразим через прогибы в  $n$  точках:

$$F(R_A, \theta_A, M_A, N_1, N_2, \dots, N_S) = \sum_{k=1}^n [v(z_k)]^2 \rightarrow \min, \quad z_k = k(L/n), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1)$$

Здесь

$$v(z_k) = f(R_A, \theta_A, M_A, N_1, N_2, \dots, N_S) \quad (2)$$

функция прогиба в точке с координатой  $z_k$  с неизвестными параметрами  $R_A, \theta_A, M_A, N_1, N_2, \dots, N_S$ ;  $k$  – номер точки;  $\theta_A$  – угол поворота,  $R_A$  реакция в точке  $A$  балки;  $M_A$  – и изгибающий момента в точке  $A$ ;  $N_1, N_2, \dots, N_S$  – искомые силы.

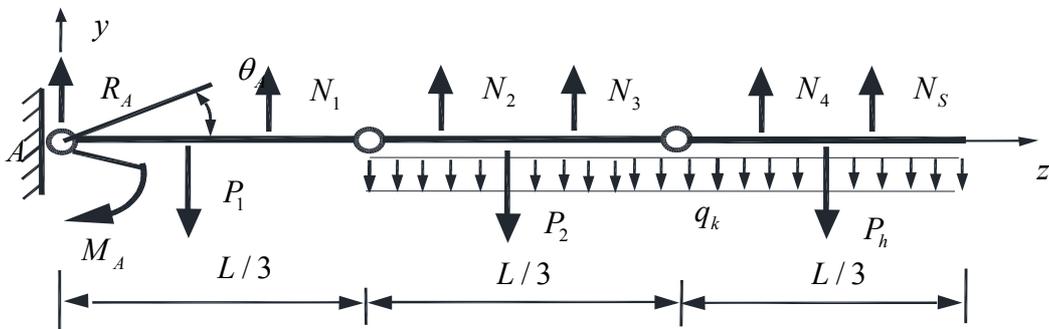


Рис. 1. Модель (расчетная схема) балки с тремя шарнирами.

В качестве ограничений к (1) добавляем уравнения равновесия:  $\sum y = 0, \sum m_i = 0$ . Из составленной системы ограничений выделим базисные переменные, например,  $R_A, N_1, N_2$ , которые подставим в (1). Теперь целевая функция (1) будет содержать только свободные переменные, что позволяет решать задачу оптимизации без ограничений [4]. Частные производные (1) по свободным параметрам дают систему линейных алгебраических уравнений, относительно искомых параметров, определяющих оптимальный план. Для вычисления прогибов (2) применен метод начальных параметров, как прямой метод интегрирования дифференциального уравнения четвертого порядка с разрывными функциями [5].

**Расчет.** Рассмотрим систему шарнирно-закрепленных между собой трех равных двутавровых балок, соединенных между собой шарнирами. В условиях гравитации система имеет собственный погонный вес  $q = 10 \text{ Н / м}$ ;  $L = 9 \text{ м}$ . Пусть система имеет жесткое защемление в точке  $A$  и поддерживается шестью тросами. Эпюра прогибов показана на рис. 2. Там же приведены вычисленные усилия в тросах (размерность с системе СИ).

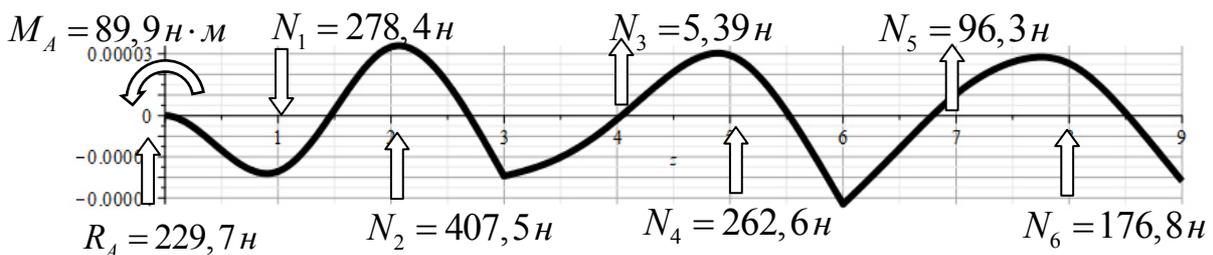


Рис. 2. Функции прогибов и силы натяжения тросов для жестко закрепления слева

### Заключение.

Имитирование невесомости необходимо при подготовке физических экспериментов. Например, если к модели балок с шарнирным опиранием в точке  $A$  задать момент (например, двигателем), равным  $89,9 \text{ н} \cdot \text{м}$ , получаем модель деформирования с жестким защемлением. Или в шарнире, в точке  $A$  можно установить пружину жесткостью  $M_A / \theta_A = 89,9 \text{ нм} / 5,78 \cdot 10^{-5} \text{ рад} = 1,5 \text{ кн} / \text{рад}$ . Естественно, усилия натяжения зависят от граничных условий.

### Библиографические ссылки

1. Анализ конструкций солнечных батарей космических аппаратов / Казанцев З. А., Ерошенко А. М., Бабкина Л. А., Лопатин А. В. // Космические аппараты и технологии № 3 (37) 2021, Том 5. 121–136., Красноярский край, Железногорск.
2. Волков М. В., Двирный В. В. Каркас солнечной батареи из труб треугольного сечения / Космические аппараты и технологии № 3 (37) 2021 Том 5. 137–145., Красноярский край, Железногорск.
3. Автоматическая система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций при раскрытии / Верхогляд А. Г., Макаров С. Н., Михалкин В. М., и др. // Изв. вузов. Приборостроение. 2016 Т. 59, № 2 С. 134–142.
4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир. 1975, 536 с.
5. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.

### References

1. Kazantsev Z. A., Eroshenko A. M., Babkina L. A., Lopatin A. V. [Analysis of spacecraft solar array designs] / *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii* No. 3 (37) 2021, Volume 5. 121–136., Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk. (In Russ.)
2. Volkov M. V., Dvirny V. V. *Karkas solnechnoj batarei iz trub treugol'nogo secheniya* [Solar battery frame from tubes of triangular section] No. 3 (37) 2021 Volume 5. 137–145. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk. (In Russ.)
3. Verkhoglyad A. G., Makarov S. N., Mikhalkin V. M., et al. [Automatic dewatering system of large-sized transformable structures during opening] . *Izv.vuzov. Instrumentation*. 2016 Vol. 59, No. 2 pp. 134-142.
4. Himmelblau D. *Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye* [Applied non-linear programming]. М.: Mir. 1975, 536 p.
5. Birger I. A., Mavlyutov R. R. *Soprotivleniye materialov* [Resistance of materials]. М.: Nauka, 1986. 560 p.

© Сабиров Р. А., Фисенко Е. Н., 2023

УДК 629.783.

## МИКРОПОРИСТЫЙ МЕТАЛЛ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С. И. Сазанак, Н. Ю. Соколов, А. А. Хвалько

<sup>1</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
<sup>2</sup>Сибирский Федеральный Университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
\*E-mail: sazanakovsi@iss-reshetnev.ru

*Классические технологии изготовления позволяют получать простые формы тепловых труб (ТТ). Например, плоские тепловые трубы Т-образной формы, встроенные в алюминиевую несущую конструкцию радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов. Аддитивные технологии позволят изготавливать ТТ сложной формы непосредственно в несущей конструкции РЭА. В исследовании решена основная проблема производства ТТ по аддитивным технологиям, разработан способ изготовления микропористого металла. Представлены результаты изготовления образцов.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, Т-образная тепловая труба, тепловая труба с микропористым фитилём, радиоэлектронная аппаратура.*

## MICROPOROUS METAL FOR HEAT PIPE BY ADDITIVE TECHNOLOGY

S. I. Sazanakov, N. Y. Sokolov, A. A. Khvalko

<sup>1</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*E-mail: sazanakovsi@iss-reshetnev.ru

*Classical manufacturing technologies make it possible to obtain simple shapes of heat pipes (HPs). For example, flat T-shaped heat pipes are built into the aluminum supporting structure of radio-electronic equipment (REE) of spacecraft. Additive technologies will allow us to produce HPs of complex shapes directly in the supporting structure of the radio-electronic equipment. The study solved the main problem of producing HP using additive technologies, and developed a method for producing microporous metal. The results of sample manufacturing are presented.*

*Keywords: additive technologies, T-shaped heat pipes, heat pipe with microporous, radio-electronic equipment (REE).*

Обеспечение тепловых режимов работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является актуальной проблемой, особенно в условиях вакуума. Тепловые трубы (ТТ) являются одним из решений для увеличения эффективности систем отвода тепла. ТТ представляет собой пассивное двухфазное устройство для передачи тепла с низким перепадом температуры. ТТ встраиваются в алюминиевую несущую конструкцию модуля [1-2]. Несущая конструкция устанавливается своей нижней частью на теплоотводящее основание и обеспечивает перенос тепла. Теплонагруженные радиоэлементы закрепляются на поверхности ТТ. Нижняя поверхность ТТ устанавливается на теплоотводящую поверхность.

В статье [1] приведены результаты экспериментальных исследований, которые демонстрируют характеристики медных и титановых Т-образных плоских ТТ. По итогам, которых медные Т-образные плоские ТТ с водой в качестве теплоносителя, являются эффективным решением для отвода тепла от электронных компонентов с высоким уровнем тепловыделения.

Аддитивная технология (технология селективного плавления металлического порошка высокоэнергетическим пучком) позволяет изготовить детали со сложной внутренней структурой, которые

не могут быть изготовлены никакими другими известными способами. Основной идеей исследования является изготовление несущей конструкции РЭА со встроенными ТТ на 3D принтере из алюминиевого сплава. Разветвленную сеть ТТ в самом корпусе возможно заложить при проектировании несущей конструкции РЭА. Для обеспечения резервирования охлаждения всех электрорадиоэлементов РЭА, без увеличения ее массы и энергопотребления, а также выравнивание температуры по всей поверхности несущей конструкции.

Проектирование высокоэффективных ТТ тесно связано с анализом теплопередающей способности этих элементов, их оптимизацией и поиском новых конструктивных решений, направленных на достижение максимальной эффективности теплопередачи. Капиллярная структура обеспечивает возврат теплоносителя из конденсатора в испаритель и распределении его по поверхности теплообмена. Капиллярный напор должен также противостоять перепаду давлений, создаваемому гидростатическим напором жидкости и перепаду давлений в паровом канале ТТ. Анализ, проведенный в источнике [3] показывает, что высокий теплоперенос в ТТ большой протяженности возможен лишь при высоких транспортных свойствах капиллярных структур, характеризующихся относительно большим гидравлическим диаметром жидкостных каналов и малым эффективным радиусом пор.

В АО «РЕШЕТНЁВ» была оформлена заявка на патент от 14.08.2023 № 2023121184. Способ изготовления микропористых металлических деталей сложной геометрической формы с помощью технологии селективного лазерного плавления производится следующими этапами:

1. С помощью системы автоматизированного проектирования (например, Solidworks, CATIA) создаётся (конструируется) виртуальная трехмерная модель детали. Конструкция трехмерной модели должна быть внутри пустотелой с сетчатой поверхностью. При этом ячейки сетки, в общем случае, должны иметь размер меньше диаметра частиц металлического порошка используемого в 3D принтере (диаметр частиц порошка составляет 50÷100 мкм). При построении сетки необходимо учитывать, что в процессе изготовления детали по технологии SLM вблизи зоны плавления имеется зона частичного расплавления, которая зависит от теплопроводности металла и времени воздействия лазерного луча. Металлический порошок представляет собой один из порошков алюминиевого сплава, порошка сплава на основе титана или порошка медного сплава.

2. Виртуальная трехмерная модель детали загружается в 3D принтер. Процесс изготовления идет послойно, сначала валик разравнивает тонким слоем порошок, при этом толщина слоя определяется настройками принтера, затем с помощью высокоэнергетического лазерного луча выборочно, согласно виртуальной трехмерной модели детали, расплавляется металлический порошок, образуя объемную сетчатую деталь 1.

3. Деталь достают из 3D принтера и очищают от остатков металлического порошка, при этом внутри детали остается заневоленный металлический порошок.

4. Деталь отжигают в среде защитного газа или вакуума для устранения термических напряжений, при этом происходит диффузионная сварка порошка внутри детали. Радиус микропор составит от 1 мкм до 50 мкм.

Известны способы изготовления пористых отливок, которые описаны в полезной модели «Устройство для изготовления пористых отливок вакуумной пропиткой» (патент RU 128136 U1) и в патенте SU 1814247 A1. Недостатком известных способов является сравнительно большой размер микропор (400 мкм), простая геометрическая форма (стержень, плита, цилиндр и т. п.) изготовленных отливок, поскольку отливка со сложной геометрией может не пропитаться полностью.

Наиболее близким к заявленному способу является способ формирования пористости для селективного лазерного аддитивного производства (патент CN111036902 A), в котором порошок металлического сплава расплавляется в двумерном сечении после нарезки трехмерной модели с помощью высокоэнергетического лазерного луча из SLM 3D принтера, при одновременном линейном снижении мощности лазера и скорости сканирования SLM 3D принтера до 10 % – 30 % от обоих заданных значений, при сохранении постоянного шага сканирования. 3D целевой продукт в виде блока пористой металлической ткани получается путем печати слой за слоем снизу-вверх. Известное изобретение использует SLM 3D печать для получения металлических пористых материалов, превращая обработку целевого продукта в процесс аддитивного производства, чтобы достичь нулевой потери сырья, избегая блокировки микропористости, обеспечивая производительность обработанного продукта. В описании способа указано, что пористые материалы имеют большое количество направленных или случайно распределенных пор диаметром от 2 мм до 3 мм, а также высокую объемную пористость от 40 % до 60 %. Этот метод спекания невозможно использовать для получения микропористых металлических деталей сложной геометрической формы с радиусом пор от 1 мкм до 50 мкм. Временные

затраты в прототипе сопоставимы с изготовлением цельнометаллической детали, поскольку мощность и скорость лазера уменьшены до 10 % – 30 % от исходных значений.

На рис. 1, 2 представлены результат трехмерной печати. Данный этап еще не завершен, первый экспериментальный образец на рис. 1 имеет габаритные размеры 30 x 30 x 3 мм, толщину стенок 0,5 мм. Согласно трехмерной модели зазор между прутьями 0,15 мм, но фактически ширина зазора составляет менее 50 мкм, порошок не высыпается через центральную часть образца. Одновременно были напечатаны образцы трехмерные модели которых имеют зазоры 0,1 мм, 0,2 мм. В образце с зазорами 0,1 мм все прутья спланились друг с другом. При печати образцов появился дефект боковых зазоров (вблизи стенок) их ширина отличается от центральных зазоров. Ширина боковых зазоров составляет более 100 мкм (порошок-наполнитель высыпался).



Рис. 1. Напечатанный образец микропористого металла

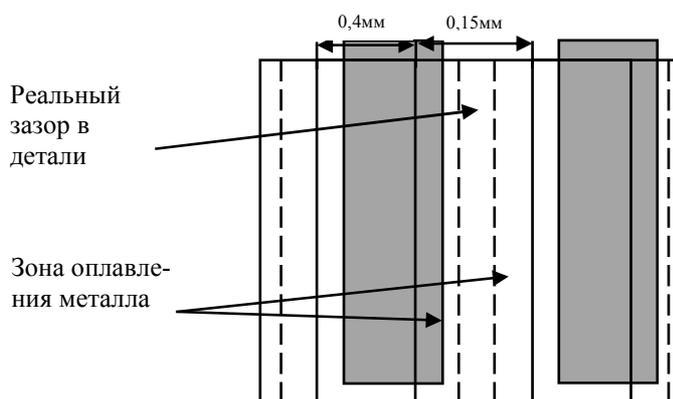


Рис. 2. Зазор согласно трехмерной модели и реальный зазоры между прутьев

Во второй партии экспериментальных деталей, было решено увеличить толщину боковых стенок с 0,5 мм до 3 мм. Прутья были разделены на 4 отрезка по 5 мм вместо одной сплошной, так как длинные прутья можно было слегка деформировать и высыпать порошок. В партии 3 образца с размерами зазоров 0,18 мм, 0,2 мм и 0,22 мм. Изготовленные образцы имели одинаковый дефект, у всех отсутствовал зазор, то есть все прутья спланились друг с другом. Зазор возле боковых стенок остался. Настройки 3D принтера не изменялись.

В настоящее время разрабатываются новые варианты образцов и выясняются причины возникновения дефектов.

### Библиографические ссылки

1. Деревянко В. А., Нестеров Д. А., Сунцов С. Б. Экспериментальные исследования медных и титановых Т-образных плоских тепловых труб // Joint 20th International Heat Pipe Conference & 14th International Heat Pipe Symposium. 2020. № 132. С. 29.
2. Деревянко В. А., Нестеров Д. А., Косенко В. Е. [и др.] Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Сибирский аэрокосмический журнал. 2013. № 6. С 6.
3. Улитенко А. И., Гуров В. С., Пушкин В. А. Принципы построения индивидуальных систем охлаждения электронных приборов и устройств. М.: Горячая линия Телеком, 2012. 286 с.

### References

1. Derevyanko V. A., Nesterov D. A., Suntsov S. B. Development of T-shaped flat heat pipes for cooling electronic equipment // Joint 20th International Heat Pipe Conference & 14th International Heat Pipe Symposium. 2020. № 132. p 29.
2. Derevyanko V. A., Nesterov D. A., Kosenko V. E/ Flat heat pipes for heat removal from electronic equipment in space vehicles // Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal. 2013. №6. p. 6.
3. Ulitenko A. I., Gurov V. S. Pushkin V. A. Principles of constructing individual cooling systems for electronic devices and devices. M.: Goryachaya Liniya Telecom, 2012. 286 p.

УДК 536.24.08: 533.6.011.6: 533.697.4

## ЗАКРУЧЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПАРА В КОРОТКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

А. В. Серяков, А. В. Конькин, Анд. П. Алексеев

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»

Российская Федерация, 173003, г. Великий Новгород, ул. Санкт-Петербургская, 64

E-mail: seryakovav@yandex.ru

*Представлены результаты экспериментальных исследований коэффициентов теплопередачи  $K_{ТТ}$  коротких тепловых труб (ТТ) с выполненным в виде сопла Лаваля паровым каналом, и с частично закрученным потоком пара внутри канала. Частичная азимутальная закрутка струйного парового потока создается с помощью наклонных инжекторных каналов диаметром 1 мм в плоском многослойном сеточном испарителе, с углом наклона  $\varphi$  относительно продольной оси в азимутальном направлении, в диапазоне  $0^\circ < \varphi < 60^\circ$ . ТТ предназначены для охлаждения космических аппаратов и спутников с ядерными энергетическими установками и с регламентацией взлетной массы.*

*Ключевые слова: короткие ТТ, закрученные течения, повышение коэффициента теплопередачи  $K_{ТТ}$ .*

## SWIRLING VAPOUR FLOWS IN THE SHORT LINEAR HEAT PIPES

A. V. Seryakov, A. V. Konkin, Andr. P. Alekseev

LLC «RUDETRANSSERVICE»

64, St. Petersburg str., Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation.

E-mail: seryakovav@yandex.ru

*The results of the experimental studies of heat transfer coefficients  $K_{HP}$  of the short heat pipes (HP's) with a Laval nozzle –liked vapour channel, and with a partially swirled vapour flow inside the channel are presented. A partial azimuthal swirling of the jet vapour stream is created using inclined injection channels with 1 mm diameter, in a flat multilayer mesh evaporator, with an angle of inclination  $\varphi$  relative to the longitudinal axis in the azimuthal direction, in the range  $0^\circ < \varphi < 60^\circ$ . HP's are designed for cooling spacecraft and satellites with nuclear power plants and with the regulation of take-off weight.*

*Keywords: short HP's, swirling currents, increasing of the heat transfer coefficient  $K_{HP}$ .*

Были созданы 10 тождественных ТТ с одинаковыми размерами, и массами заправки диэтиловым эфиром,  $\delta m/m \leq 0.1\%$ , рис. 1.

На рис. 2 изображен фрагмент испарителя с инжекторными каналами, формирующими частичное закрученное струйное течение пара.

На рис. 3 показана расчетная схема течения пара в канале с углом наклона  $\varphi = 30^\circ$  вдоль оси.

На рис. 4 приведены расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{вп}$  выполненного в виде сопла Лаваля парового канала ТТ, в зависимости от угла наклона инжекторных каналов испарителя к продольной оси.

На рис. 5 представлены результаты измерений коэффициентов теплопередачи  $K_{ТТ}$  тождественных ТТ, отличающихся только углами наклона  $\varphi$ , при температурном напоре на испарителе

$$\delta T = T_{ev} - T_B = (20 \pm 0.03) \text{ K.}$$

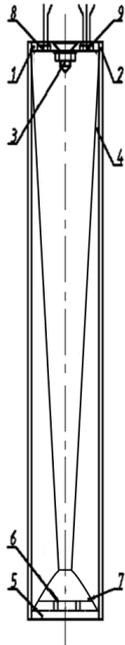


Рис. 1. Схема ТТ:

1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – запорный узел; 4 – капиллярно-пористая вставка; 5 – нижняя крышка; 6 – инжекторные каналы плоского капиллярно-пористого испарителя; 7 – плоский капиллярно-пористый испаритель. Внутри верхней крышки установлены три емкостных датчики 8, 9, 10, предназначенные для измерения толщины и температуры пленки конденсата



Рис. 2. Изображение одной из заготовок многослойного капиллярно-пористого испарителя ТТ с размером ячеек 0.04 мм. Хорошо видны четыре инжекторных канала диаметром 1 мм для выхода и формирования струй пара, пронизывающих насквозь круглые заготовки по 10 слоев сетки в каждой

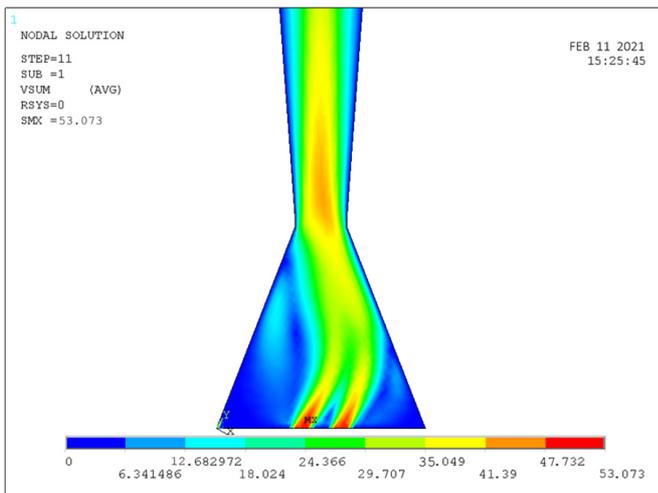


Рис. 3. Режим течения влажного пара в ТТ. Угол наклона инжекторных паровых каналов к продольной оси в азимутальном направлении  $\varphi = 30^\circ$ . Перегрев испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира задан равным  $\delta T = T_{ev} - T_B = 15K$ , скорость пара м/с

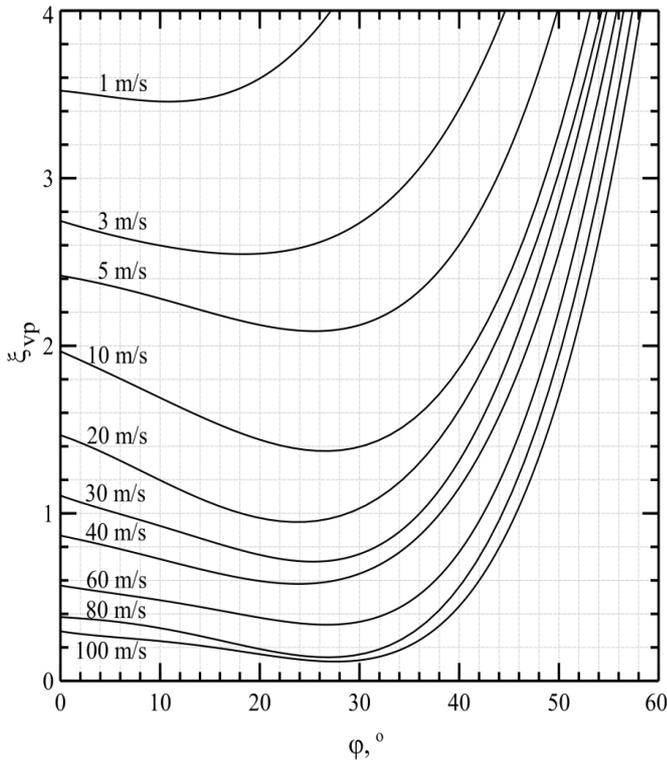


Рис. 4. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{vp}$  закрытого плоскими крышками парового канала ТТ с инжекторными струйными течениями при различных углах наклона  $\varphi$  в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_{vp} = 10^3 - 10^5$ . Цифры на кривых в левой части рисунка означают среднюю скорость течения пара в паровом канале ТТ, м/с

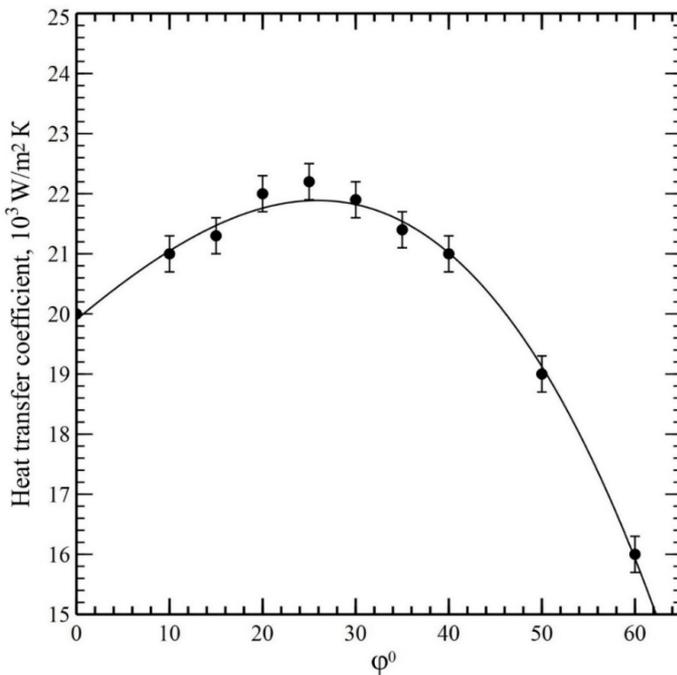


Рис. 5. Коэффициент теплопередачи  $K_{TT}$  коротких ТТ в зависимости от геометрического угла наклона  $\varphi^\circ$  инжекторных каналов в испарителях, при одном и том же температурном напоре на испаритель  $\delta T = T_{ev} - T_B = (20 \pm 0.03) \text{ K}$ . Максимум кривой определен нами при  $\varphi = 26^\circ \pm 1^\circ$

Дополнительное азимутальное вращение исходного тороидального вихря конденсирующегося пара с аксиальным вращением, приводит к дополнительному снижению статического давления в его центре на продольной оси и увеличению перепада давления в паровом канале ТТ между испарителем и центром тороидального вихря вблизи поверхности конденсации.

УДК 629.783

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНЕНИЯ КА В ПРОЦЕССЕ КОРРЕКЦИИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ПО СХЕМЕ СПИТЦЕРА

И. М. Сецко, А. А. Внуков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
E-mail: radiusskywin@gmail.com

*Рассматривается возможность совмещения коррекций наклонения и эксцентриситета за счет поворота вектора тяги двигателей КА. Приводятся формулы зависимости величины изменения наклонения и эксцентриситета от угла поворота тяги двигателей.*

*Ключевые слова: схема Спитцера, коррекции наклонения, довыведение КА.*

## ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF CORRECTING THE INCLINATION OF A SPACECRAFT IN THE PROCESS OF CORRECTING ECCENTRICITY USING THE SPITZER SCHEME

I. M. Setsko, A. A. Vnukov

JSC “Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk territory, 662972, Russian Federation  
Siberian State University,  
82a, Svobodni prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*The possibility of combining corrections of inclination and eccentricity by rotating the thrust vector of the spacecraft engines is being considered. Formulas that linked the magnitude of the inclination and eccentricity changing due to thrust vector of the spacecraft engines direction are obtained.*

*Keywords: Spitzer scheme, inclination correction, additional insertion of spacecraft.*

Сегодня в мире происходит активное развитие космической техники. Появление новых технологий и развитие существующих позволяет создавать все более совершенные космические аппараты и средства их доставки на целевые орбиты.

Однако стремление повысить экономическую эффективность средств выведения приводит к значительному превышению массы КА (или блока КА), выводимого на переходную орбиту с целью дальнейшего его довыведения на целевую орбиту при помощи собственной двигательной установки КА (ЭРДУ). При этом, поскольку процесс довыведения КА при помощи ЭРДУ занимает несколько месяцев, для обеспечения требуемого наклонения КА на целевой орбите после завершения довыведения наклонение начальной орбиты довыведения выбирается с учётом скорости естественной эволюции наклонения орбиты под действием лунно-солнечных возмущений, составляющей, в среднем,  $0,85^\circ$  в год [1]. Поскольку абсолютное большинство космодромов имеют географическую широту отличную от нуля, такой подход также приводит к уменьшению начального эксцентриситета орбиты довыведения КА на ГСО за счёт перераспределения затрат импульса средств выведения на изменение наклонения переходной орбиты в пользу увеличения высоты перигея переходной орбиты.

Цель нашей работы рассмотреть возможность использования ЭРДУ КА для активного уменьшения наклонения орбиты космического аппарата при выведении его на геостационарную орбиту по схеме Спитцера, что позволит выводить КА на начальные орбиты довыведения с большим наклонением, сокращая таким образом величину эксцентриситета начальной орбиты, а следовательно, и длительность довыведения КА на ГСО.

Отличительной особенностью схемы Спитцера является то, что она рассматривает доведение КА как задачу изменения эксцентриситета путём выдачи импульса тяги в плоскости орбиты [2], что не позволяет изменять наклонение орбиты КА.

Можно выделить три основных способа изменения наклонения и эксцентриситета в процессе доведения КА на ГСО:

- 1) приведение эксцентриситета орбиты КА к удовлетворительному значению с последующим приведением наклонения к удовлетворительному значению;
- 2) приведение наклонения орбиты КА к удовлетворительному значению с последующим приведением эксцентриситета к удовлетворительному значению;
- 3) одновременное приведение эксцентриситета и наклонения орбиты КА к удовлетворительным значениям [3].

Для использования ЭРДУ для изменения наклонения следует поворачивать КА вокруг его центра масс, тем самым отклоняя вектор тяги двигателей коррекции от плоскости орбиты, что приведет к уменьшению эффективности изменения эксцентриситета, но даст возможность изменять наклонение. Данный вывод сделан на основе формул [4]:

$$\Delta e = \cos(\alpha) * \Delta V \quad (1)$$

$$\Delta i = \sin(\alpha) * \Delta V \quad (2)$$

Исходя из представленных формул видно, что скорость изменения наклонения будет зависеть от угла отклонения двигателей КА от плоскости орбиты.

Чем больше угол поворота КА, тем больше будет скорость изменения наклонения и тем меньше будет скорость изменения эксцентриситета, и граничным условием этой задачи является не превышение времени изменения наклонения орбиты КА над временем изменения эксцентриситета КА [5].

Таким образом, задачей дальнейшего исследования является оптимизация угла тангажа КА (ориентации вектора тяги двигателей коррекции КА), обеспечивающего изменение наклонения орбиты КА за время изменения эксцентриситета орбиты КА, с учётом влияния величины начального наклонения орбиты КА на величину начального эксцентриситета орбиты КА. При этом 3 способ изменения наклонения и эксцентриситета из предложенных ранее является более предпочтительным, так как позволяет оптимизировать расход времени и топлива в процессе маневров.

Кроме того, задача поворота корпуса КА является комплексной: требуется не только оценить достигаемые за счёт поворота параметры доведения, но также и убедиться, что изменение освещённости солнечных батарей и радиационных панелей КА, вызываемое таким поворотом, не окажет существенного влияния на энергетический и тепловой баланс КА.

### Библиографические ссылки

1. Ю. Сухой, Коррекции орбит стационарных спутников//Спутник+, Москва, 2011, 119 с.
2. Г. Чернявский, В. Бартенев, В. Малышев, Управление орбитой стационарных спутников//Машиностроение, 1984, 144 с.
3. К. Алексеев, Г Бебенин, Управление космическими летательными аппаратами // Машиностроение, 1974, 280 с.
4. Кэнг, Кеехен Выведение на заданную долготу и управление орбитой 24-часового экваториального спутника Земли// Наука, 1976, 512 с.
5. П. Эльясберг Введение в теорию полета искусственных спутников Земли// Наука, 1965, 540 с.

### Referense

1. Y. Suhoj, Korrekcii orbit stacionarnyh sputnikov // Sputnik++, Moscow, 2011, P. 119.
2. G. Chernyavskiy, V. Bartenev, V. Malyshev, Upravleniye orbitoy stasionaknykh sputnikov [Control of the orbit of stationary satellites] // Mashinostroyeniye, 1984, P. 144.
3. K. Alekseyev, G. Bebenin, Upravleniye kosmicheskimi letatel'nyimi apparatami [Control of spacecraft] // Mashinostroyeniye, 1974, P. 280.
4. Keng, Keyekhen. Vyvedeniye na zadannuyu dolgotu I upravleniye orbitoy 24-chasovogo ekvatorial'nogo sputnik Zemli [Launching to a given longitude and controlling the orbit of a 24-hour equatorial satellite of the Earth] // Nauka, 1976, P. 512.
5. P. El'yasberg. Vvedeniye v teoriyu poleta iskusstvennykh sputnikov Zemli [Introduction of the theory of flight of artificial Earth satellitys] // Nauka, 1965, P. 540.

УДК 629.76/78.001.63

## ЛЕНТОЧНЫЕ ШАРНИРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КОНСТРУКЦИЯХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ РЕФЛЕКТОРОВ

П. Е. Слепцов<sup>1</sup>, Ю. А. Кисанов<sup>1</sup>, В. И. Церихов<sup>1</sup>, И. В. Матросова<sup>1</sup>, Ю. А. Чалова<sup>1</sup>

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*Исследованы свойства ленточных шарниров, построена теоретическая модель, приведены результаты экспериментальных исследований, предложены варианты их использования в различных конструкциях рефлекторов.*

*Ключевые слова: ленточный шарнир, теоретические и экспериментальные исследования, силовая характеристика, конструкции рефлекторов.*

## RIBBON JOINT AND THEIR APPLICATION IN THE DESIGNS OF TRANSFORMABLE REFLECTORS

P. E. Sleptsov<sup>1</sup>, Yu. A. Kisanov<sup>1</sup>, V. I. Tserikhov<sup>1</sup>, I. V. Matrosova<sup>1</sup>, Yu. A. Chalova<sup>1</sup>

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*The properties of tape hinges are investigated, a theoretical model is constructed, the results of experimental studies are presented, and options for their use in various designs of reflectors are proposed.*

*Keywords: ribbon joint, theoretical and experimental researches, power characteristics, reflector designs.*

Новые спутники требуют адаптированных механизмов с хорошей эффективностью при низкой стоимости и весе. Следуя этой философии, настоящий доклад имеет дело с успешным примером самоприводящегося, направляющего и фиксирующего шарнира для развертывания антенны.

Ленточный шарнир [1] состоит из двух пружин-лент скрепленных концевыми блоками и усадками. Усадки – это элементы в виде оболочек, повторяющие форму профиля ленты, они надежно удерживают ленты от поворота и смещения относительно концевых блоков (рис. 1).

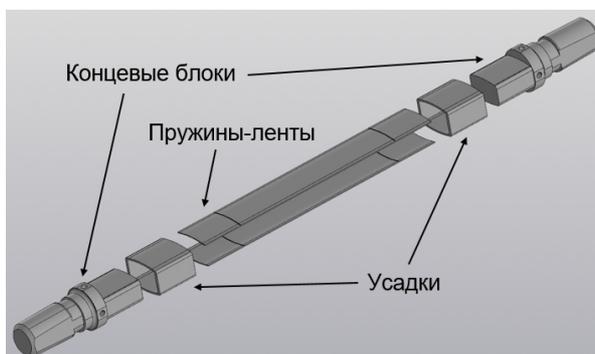


Рис. 1. Конструкция ленточного шарнира

Особенностью ленточного шарнира является уникальная возрастающая силовая характеристика (рис. 2, а).

Описанная силовая характеристика позволяют использовать ленточные шарниры в конструкциях рефлекторов с возрастающей характеристикой сопротивления в качестве приводов и фиксаторов.

На рис. 3 показан каркас макета ферменного рефлектора размером 1 м К<sub>а</sub> диапазона, приводом которого являются ленточные шарниры в стержнях лицевой и тыльной сетей.

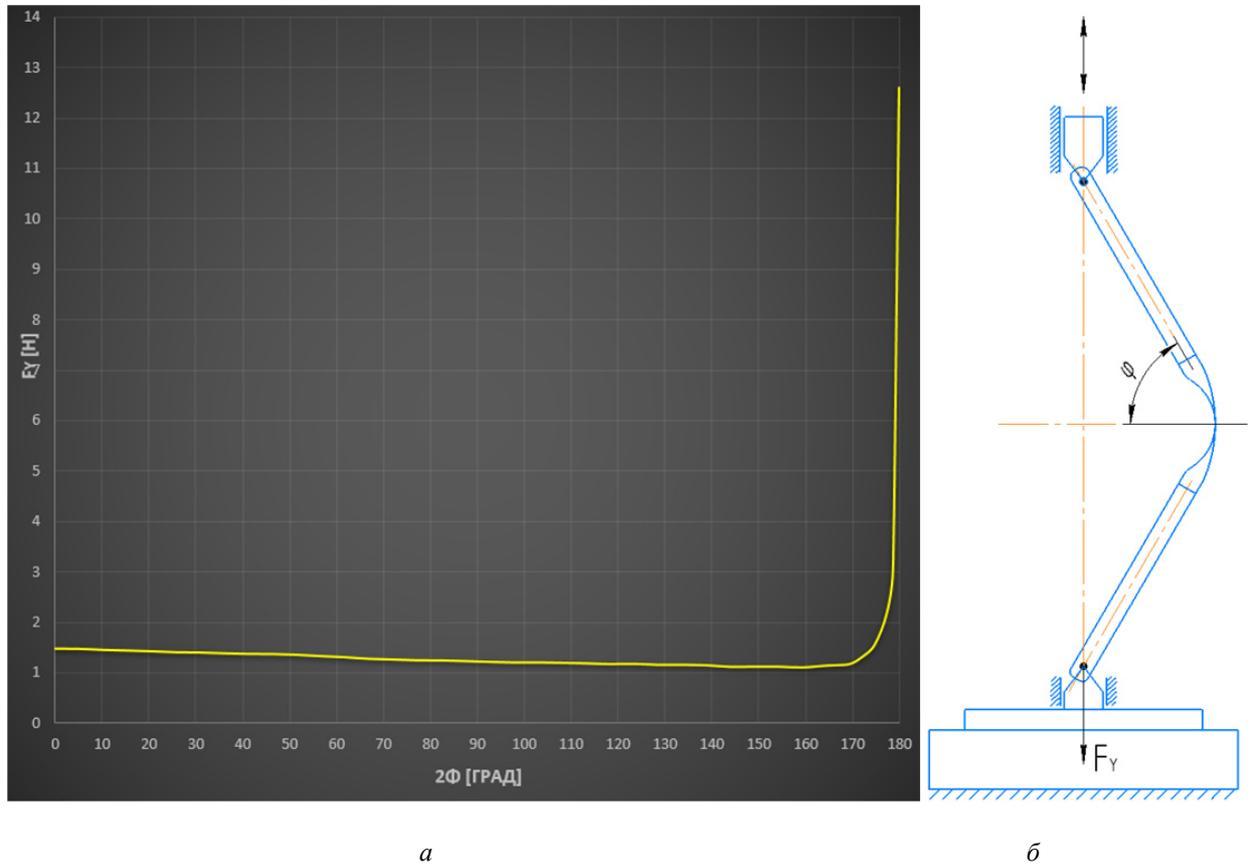


Рис. 2. Силовая характеристика ленточного шарнира. Результат эксперимента (а);  
схема измерительного стенда (б)

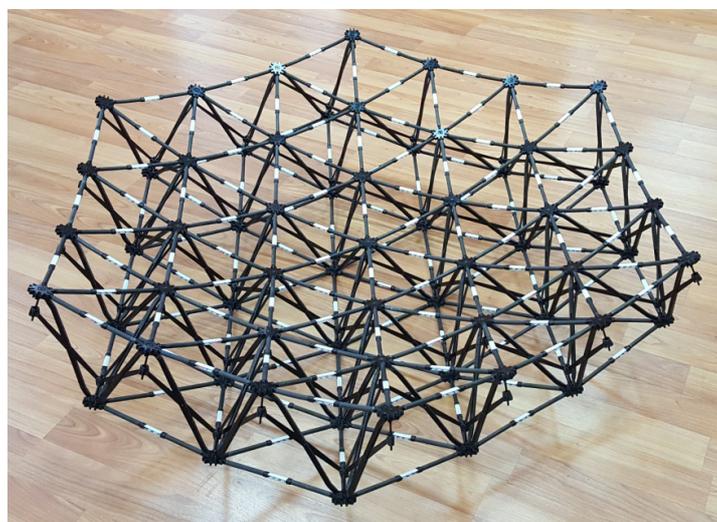


Рис. 3. Каркас ферменного рефлектора, собранный с применением ленточных шарниров

В спицевых рефлекторах ленточные шарниры могут быть использованы в качестве основного привода развёртывания и во внешнем фиксирующем контуре.

В ободных рефлекторах они также могут быть использованы в качестве привода развёртывания.

### Библиографические ссылки

1. Пат. 2291528 Российская Федерация, <sup>МПК<sup>51</sup></sup> Н 01 Q 15/20. Шарнирный узел складного рефлектора космической антенны / Кудрявцев И. А. № 2005126522/09; заявл. 22.08.2005; опубл. 10.01.2007, Бюл. № 1. 11 с.
2. Modeling of snap-back bending response of doubly slit cylindrical shells. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference 19–22 April 2004 / Silver M.J., Hinkle J.D., Peterson L.D. // Palm Springs, California, 2004, 15 с.
3. J.C.H. Yee, O. Soykasap and S. Pellegrino. «AIAA 2004-1819. Carbon Fibre Reinforced Plastic Tape Springs», University of Cambridge, Cambridge, CB2 1PZ, UK, 2004. 9 с.
4. S. Pellegrino, C. Green, S.D. Guest, A. Watt. «SAR Advanced Deployable Structure», Matra Marconi Space and University of Cambridge, Cambridge, UK, 2000. 57 с.
5. Исследование механического поведения упруготрансформируемых композитных конструкций / В.И. Халиулин, В.В. Батраков, Л.П. Шабалин, М.Ю. Киаука, О.Н. Беззаметнов // Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева КАИ, Казань, Россия, 2019. 195 с.

### References

1. Kudryavtsev I. A. [Hinge assembly of the folding reflector of the space antenna]. Patent RF, no. 2291528, 2005.
2. Silver M.J., Hinkle J.D., Peterson L.D. [Modeling of snap-back bending response of doubly slit cylindrical shells. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference 19-22 April 2004] Palm Springs, California, 2004, 15 p.
3. J.C.H. Yee, O. Soykasap and S. Pellegrino. [AIAA 2004-1819. Carbon Fibre Reinforced Plastic Tape Springs] University of Cambridge, Cambridge, CB2 1PZ, UK, 2004. 9 p.
4. S. Pellegrino, C. Green, S.D. Guest, A. Watt. [SAR Advanced Deployable Structure] Matra Marconi Space and University of Cambridge, Cambridge, UK, 2000. 57 p.
5. V.I. Khaliulin, V.V. Batrakov, L.P. Shabalin, M.Yu. Kiauka, O.N. Bezzametnov [Investigation of the mechanical behavior of elastotransformable composite structures] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev KAI, Kazan, Russia, 2019. 195 p.

© Слепцов П. Е., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., Чалова Ю. А., 2023

УДК 67.02

## ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА СБОРКИ ПИРОЧЕК С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

И. В. Стеблицкая<sup>1,2\*</sup>, Н. Б. Захаревич<sup>1,2</sup>, Е. А. Иванченко<sup>1,2</sup>, А. Г. Клепиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: steblickaya.irina@mail.ru

*В статье рассмотрены результаты внедрения принципов бережливого производства для организации рабочего места сборки пирочек.*

*Ключевые слова: бережливое производство, технологический процесс, рабочее место, сборка, испытания.*

## ORGANISING THE WORKPLACE FOR ASSEMBLING PYROTECHNIC PRODUCT USING LEAN PRODUCTION PRINCIPLES

I. V. Steblickaya<sup>1,2</sup>, N. B. Zaharevich<sup>1,2</sup>, E. A. Ivanchenko<sup>1,2</sup>, A. G. Klepikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
<sup>2</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*The article discusses the results of the introduction of lean manufacturing principles for the organization of the workplace of assembling pyrotechnic product.*

*Keywords: lean manufacturing, technological process, workplace, assembling, tests.*

В конструкциях космических аппаратов производства АО «РЕШЕТНЁВ» широко применяются пиротехнические устройства в качестве основных элементов разделения в системах зачехления раскрывающихся элементов механических систем, таких как устройства отделения, штанг антенн, солнечных батарей, штанг систем ориентации и других. Составной частью этих устройств являются пирочки, представляющие собой конструкцию из корпуса, двухмостикового пиропатрона (ПП), поршня и других элементов. Пирочки используются не только в процессе эксплуатации, но и в процессе различных испытаний.

Заключение о годности пирочки для установки ее на изделия дается на основании положительных результатов приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) всей партии и периодических испытаний (ПИ), которым подвергаются пять пирочек от партии, прошедшей ПСИ. Изготовление пирочек производится партиями от нескольких десятков до нескольких сот изделий. Исходя из этого возникает необходимость прохождения полного цикла сборки и испытаний всех пирочек от партии в кратчайшие сроки.

Технологический процесс изготовления пирочки состоит из более чем трех десятков технологических переходов. При изучении существующего порядка прохождения изделий по сборочным операциям, определенного технологическим процессом, и расстановки технологического оборудования на участке сборки, выявлен ряд потерь времени, вызванный:

- излишним перемещением изделия от стола сборки к стационарно установленным весам и обратно;
- выполнением повторяющихся операций (демонтаж/установка защитного колпачка на разъем пиропатрона перед весовым контролем, при внешнем осмотре, при проведении электрических проверок);
- неотлаженными действиями исполнителей (отсутствие четкого разделения технологических переходов между исполнителями приводит к простоя одного из них);
- применением многоконтактного кабеля для проверки электрических параметров пиропатрона с затертой маркировкой контактов кабеля, что осложняет процесс проверки и может привести к ошибке исполнителя.

Процесс осложнён необходимостью пооперационного предъявления на контроль представителю заказчика (ПЗ) всех операций поочередно, что значительно замедляет процесс проведения испытаний.

В сборочном цехе АО «РЕШЕТНЁВ» с 2023 года внедряются принципы бережливого производства (БП). Концепция БП базируется на соответствующей философии, ценностях, принципах, методах и инструментах [1]. Так как основная цель БП – систематическое и постепенное уменьшение количества процессов, операций, действий, не добавляющих продукту потребительской ценности [2], то применение ее принципов в конкретном производственном случае позволит производить продукцию в минимальные сроки с минимальными затратами с требуемым потребителем качеством и упростить организационную структуру.

Концепция БП обладает большим спектром инструментов для достижения поставленной цели. В нашем конкретном случае для повышения эффективности и управляемости операционной зоны, увеличения производительности труда, экономии времени и совершенствования культуры производства на этапе изготовления и испытаний пирочек могут стать действенными инструментами: цветовая маркировка (инструмент БП Защита от непреднамеренных ошибок (Poka-Yoke) [3], реорганизация рабочего места для сокращения потерь и снижения временных затрат (инструмент Организация рабочего пространства [4])

Нанесение удобной для восприятия цветовой маркировки технологического кабеля сократило время идентификации необходимых контактов при проведении предварительных и приемосдаточных испытаний. Парно скрепив контакты мостиков для удобства первых двух замеров, на один из контактов каждой пары устанавливается флажок для замеров сопротивления изоляции. Цветовая маркировка пар контактов, выделение одного контакта из пары и контакта корпуса флажками облегчили поиск необходимого наконечника и минимизировали возможность ошибки в процессе многократно повторяющейся операции.

Проведение пооперационного хронометража цикла ПСИ без учета организационных потерь времени (оформление документации, процедура предъявления на контроль ПЗ и т. д.) позволило оценить эффективность проведенных мероприятий. Суммарное время рассматриваемого цикла составило в среднем 10 мин. 5 сек., соответственно, за 8-ми часовую смену непрерывной работы может быть проведено пооперационно 44 пирочки. Четкое разграничение действий между двумя исполнителями и размещение на рабочем месте весов исключает потери времени на излишние перемещения исполнителя к стационарно-установленным весам, а также исключает необходимость установки колпачка дважды. При предлагаемой организации технологического процесса время на обработку одной пирочки составляет 5 мин., что позволяет за рабочую смену проводить пооперационно 96 пирочек.

Целесообразность принятых решений очевидна. На локальном примере приходим к выводу, что при анализе существующих производственных процессов внедрение простых и финансово незатратных решений позволяет повысить эффективность работы и сократить временные затраты на технологические циклы, не снижая качества изделия.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56020-2020 Бережливое производство. Основные положения и словарь. Москва: Стандартиформ, 2020. 16 с.
2. Что такое бережливое производство и зачем его внедрять [Электронный ресурс]. URL: <https://rb.ru/opinion/lean-manufacturing/> (дата обращения 15.09.2023)
3. Рабочая инструкция «Системы защиты от ошибок (Poka Yoke)» [Электронный ресурс]. URL: <https://gostost.ru/instrukcij-poka-yoke/> (дата обращения 15.09.2023)
4. ГОСТ Р 56407-2015 Бережливое производство. Основные методы и инструменты. Москва: Стандартиформ, 2020. 12 с.

#### References

1. *GOST R 56020-2020. Berezhliyoye proizvodstvo. Osnovnyye polozheniya i slovar'.* [State Standard R 56020-2020. Lean production. Fundamentals and vocabulary]. Moscow: Standartinform Publ, 2020. 16 p.
2. *Chto takoye berezhliyoye proizvodstvo i zachem yego vnedryat'* [What is lean manufacturing and why implement it]. Available at: <https://rb.ru/opinion/lean-manufacturing/> (accessed 15.09.2023)
3. *Rabochaya instruktsiya «Sistemy zashchity ot oshibok (Poka Yoke)»* [Working instructions «Error protection systems (Poka Yoke)»]. Available at: <https://gostost.ru/instrukcij-poka-yoke/> (accessed 15.09.2023)
4. *GOST R 56407-2015. Berezhliyoye proizvodstvo. Osnovnyye metody i instrumenty.* [State Standard R 56407-2015. Lean production. Basic methods and tools]. Moscow, Standartinform Publ, 2020. 12 p.

УДК 629.78; 621.791.72

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ В ОРБИТАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

С. Ю. Телешун<sup>1</sup>, В. В. Двирный<sup>1,2,3</sup>, В. В. Храпунова<sup>3</sup>, Г. В. Двирный<sup>3</sup>, А. А. Шевчук<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

*Рассмотрены основные особенности применения электронно-лучевой сварки в орбитальных условиях с учетом влияния вакуума и экстремальных температур, а также пути дальнейшего развития технологий сварки в открытом космосе на основе перспективных технологий.*

*Ключевые слова: космический аппарат, сварка в открытом космосе, электронно-лучевая сварка, эмиссионная система, электронный пучок.*

## FEATURES OF APPLICATION OF WELDING TECHNOLOGIES IN ORBITAL CONDITIONS

S. Yu. Teleshun<sup>1</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1,2,3</sup>, V. V. Hrapunova<sup>3</sup>, G. V. Dvirniy<sup>3</sup>, A. A. Shevchuk<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»

52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*We analyzed the main features of application of electron beam welding in orbital conditions, taking into account the influence of vacuum and extreme temperatures, as well as ways for further development of welding technologies in outer space based on promising technologies.*

*Keywords: spacecraft, welding in open space, electron beam welding, emission system, electron beam.*

Электронно-лучевая сварка, в сравнении с традиционными способами сварки, имеет ряд выгодно отличающих ее преимуществ. Благодаря максимальной скорости кристаллизации металла деформации изделия минимальны, а высокие физико-механические характеристики сварного соединения непосредственно после сварки позволяют исключить последующую механическую и термическую обработку.

Начиная с 60-х годов, электронно-лучевую сварку используют при производстве ракетно-космической техники для получения неразъемных соединений в конструкциях из алюминиевых сплавов, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов и сплавов на основе никеля, в частности, при производстве кольцевых секций топливных баков и двигательных установок ракетно-космических комплексов [1].

Новая область применения электронно-лучевой сварки – работы в условиях космического пространства, например, монтажные или ремонтно-восстановительные работы на больших орбитальных станциях.

Сварка в открытом космосе происходит в сложных условиях: вакуум до  $10^{-12}$  мм рт. ст., большая скорость диффузии газов, невесомость и широкий интервал температур от  $-150$  до  $130$  °С, что предъявляет особые требования к методам, технологии и аппаратуре сварки. Так, в Институте электросварки имени Е. О. Патона создан, прошел в 1990–1991 гг. наземные испытания и получил высокую оценку комплекс электронно-лучевой сварочной аппаратуры «Универсал», предназначенной для оснащения больших орбитальных станций типа «Мир-2» [2].

В 2015 г. в стадии разработки находился инструмент нового поколения в двух вариантах – ручном и автоматизированном, в составе робота или прецизионного манипулятора [3], эмиссионные системы электронно-лучевой пушки которого должны обеспечивать повышенную общую (до 2,5 кВт) и удельную (до 9 кВт/мм<sup>2</sup>) мощность пучка в непрерывном и импульсном режимах. Толщина свариваемого металла в этом случае может быть увеличена до 4–5 мм.

В отличие от ранее применявшихся электронно-лучевых пушек с диодными эмиссионными системами и прямонакальными катодами для работы в условиях открытого космоса, разрабатываемая эмиссионная система – триодного типа, в которой катод подогревается электронной бомбардировкой и работает в режиме ограничения тока эмиссии пространственным зарядом электронного пучка, а мощность пучка изменяется подачей отрицательного относительно катода регулируемого потенциала на модулирующий (фокусирующий) электрод при неизменном ускоряющем напряжении и постоянной температуре катода (рис. 1) [3].

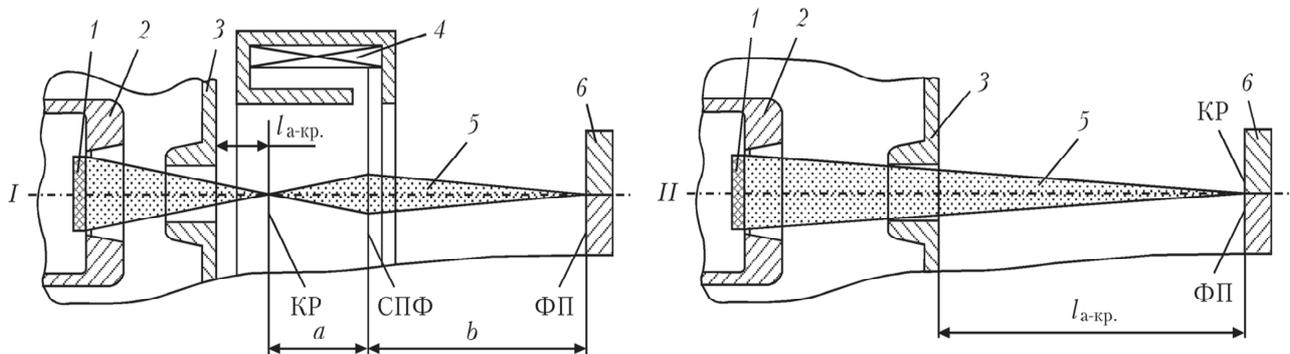


Рис.1. Схемы эмиссионных систем пушек для электронно-лучевой сварки в космосе:

- I* – для автоматизированного варианта; *II* – для ручного варианта;  
 1 – катод; 2 – фокусирующий электрод; 3 – анод; 4 – электромагнитная фокусирующая линза;  
 5 – электронный пучок; 6 – свариваемое изделие; КР – кроссовер; СПФ – средняя плоскость фокусирующей линзы; ФП – фокальная плоскость;  $l_{a-кр.}$  – расстояние анод–кроссовер;  
 $a$  – расстояние вдоль оси системы КР–СПФ;  $b$  – расстояние вдоль оси системы СПФ–ФП

Следует отметить, что низкие температуры открытого космоса создают условия для создания компактного сварочного оборудования с использованием явления высокотемпературной сверхпроводимости, в котором сверхпроводящие обмотки сварочного оборудования не содержат традиционный магнитомягкий шихтованный железный сердечник, поскольку поле будет сверхмощным [4].

В настоящее время одним из наиболее эффективных по комплексу свойств материалов, определяющим перспективное применение сверхпроводников в реальных устройствах, в том числе и в космической технике, является керамика на основе окиси иттрия Y-Ba-Cu-O (YBCO), имеющая критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние 93 К [5].

### Библиографические ссылки

1. Уланов М.А. Особенности технологии электронно-лучевой сварки в ракетостроении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Красноярск, 2022. Т. 1. С. 154-157.
2. Липатов Р.В., Меньщиков Е.Ю., Лаптенко В.Д. Геополитические аспекты применения электронно-лучевой сварки в космосе // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Красноярск, 2014. Т. 1. С. 334-335.

3. Зубченко Ю.В., Терновой Е.Г. Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса // Автоматическая сварка. 2015. № 12 (748). С. 36-40.
4. Тестоедов Н.А., Туркенич Р.П., Двирный Г.В. [и др.]. Новые возможности технологии сварки для космической отрасли // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. науч. конф. Красноярск : СибГАУ, 2007. С. 135–136.
5. Маевский В.А., Асеев В.В., Ивлев А.С. [и др.]. Некоторые возможные области использования технологий высокотемпературной сверхпроводимости в программе освоения Луны // Космическая техника и технологии. 2019. № 2 (25). С. 14-27.

#### References

1. Ulanov M. A. *Osobennosti tekhnologii elektronno-luchevoy svarki v raketostroyenii* [Features of electron beam welding technology in rocket science]. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2022, vol. 1, p. 154–157 (In Russ).
2. Lipatov R. V., Menshchikov E. Yu., Laptенок V. D. *Geopoliticheskiye aspekty primeneniya elektronno-luchevoy svarki v kosmose* [Geopolitical aspects of the use of electron beam welding in space]. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2014, vol. 1, p. 334–335 (In Russ).
3. Zubchenko Yu. V., Ternovoy E. G. *Razrabotka novykh emissionnykh sistem elektronno-luchevykh pushek dlya tekhnologicheskikh rabot v usloviyakh kosmosa* [Development of new emission systems of electron beam guns for technological work in space conditions]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, no. 12 (748), p. 36-40 (In Russ).
4. Testoyedov N. A., Turkenich R. P., Dvirnyy G. V., Smirnov K. A., Hrapunova V. V. *Novyye vozmozhnosti tekhnologii svarki dlya kosmicheskoy otrasli* [New possibilities in welding technology for the space industry]. *Reshetnevskiy chteniya*, 2007, p. 135-136 (In Russ.).
5. Mayevskiy V. A., Aseyev V. V., Ivlev A. S., Nizhelskiy N. A., Sysoyev M. A., Sinyavskiy V. V. *Nekotoryye vozmozhnyye oblasti ispolzovaniya tekhnologiy vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti v programme osvoyeniya Luny* [Some possible areas of use of high-temperature superconductivity technologies in the lunar exploration program]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 2 (25), p. 14-27 (In Russ.).

© Телешун С. Ю., Двирный В. В., Храпунова В. В., Двирный Г. В., Шевчук А. А., 2023

УДК 62-278

## РАЗРАБОТКА ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ГИБКИМ МЕМБРАНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Г. С. Терлецкий, В. Б. Тайгин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: SNT60@mail.ru

*В статье представлены результаты разработки мембранной антенны космического аппарата, описаны этапы разработки конструкции, испытания полимерных композиционных материалов с разными свойствами, испытания антенны на раскрытие.*

*Ключевые слова: мембранные антенны, рефлектор, космический аппарат, трансформируемые антенны.*

## DEVELOPMENT OF A TRANSFORMABLE MIRROR ANTENNA WITH A FLEXIBLE MEMBRANE REFLECTOR

G. S. Terletskiy, V. B. Taygin

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: SNT60@mail.ru

*The article presents the results of the development of a membrane antenna for a spacecraft, describes the stages of design development, testing of polymer composite materials with different properties, and testing the antenna for deployment.*

*Keywords: membrane antennas, reflector, spacecraft, transformable antennas.*

При проектировании современного космического аппарата, в частности космических аппаратов информационного обеспечения наиболее остро стоит вопрос компактного размещения полезной нагрузки на астроплате космического аппарата. Для компактного размещения антенн на астроплате применяется множество видов складывания и трансформации рефлекторов антенн. На сегодняшний день трансформируемые рефлектора производимые в России используют для формирования отражающей поверхности сетиполотно, поддерживаемое спицами или системой арамидных шнуров. Зонтичные антенны, применяемые в том числе на космических аппаратах серии «Луч», имеют характерную особенность, профиль рефлектора является не параболоидом вращения, а скорее многогранной призмой так как сетиполотно между спицами не может поддерживать форму параболоида, а натягивается по прямой. В крупногабаритных трансформируемых рефлекторах натяжение рабочего профиля производится системой арамидных шнуров, что в свою очередь приводит к появлению эффекта подушки «Pillow Effect» данный эффект представлен вздутием сетиполотна между точками натяжения. Данные эффекты свою очередь являются основной причиной снижения коэффициента усиления антенны [1].

В данной работе был произведен анализ существующих конструкций мембранных антенн, которые были представлены в свободном доступе [2-8]. Подробно изучив материалы, применяемые в мембранных антеннах, было принято решение отказаться от применения полиамидных и полиимидных пленок из-за образования заломов при складывании неустойчивом поведении при термовакуумных испытаниях, и сложности формования изделия из них. Также в отличии от композиционных материалов пленкам свойственно разрастание трещин и изломов [8]. По данным причинам материалом мембраны был выбран волокнистый полимерный композиционный материал.

Конструкция антенны включает в себя основание с двенадцатью спицами прикреплённых на самораскрывающиеся гибкие шарниры, спицы в свою очередь крепятся к мембране только в точки расположенной на краю рефлектора.

Данная конструктивная особенность обусловлена тем что мембрана способна самостоятельно поддерживать свою форму в раскрытом состоянии и при динамических нагрузках. Тела двойной кривизны, при определенных граничных условиях, имеют крайне высокие тона колебаний.

Для формования мембраны была использована оснастка из алюминия внешняя поверхность которой повторяет заданный параболоид вращения. В качестве связующего был применён кремний органический компаунд «пентэласт» так как эпоксидные и полиэфирные смолы не подходили по причине своей жесткости и хрупкости. Далее были изготовлены мембранные отражатели из стеклоткани и углеродной ткани. Пропитка ткани производилась на оснастке (рис. 1).



Рис. 1. Формование мембранных отражателей на оснастке

Далее к мембранам необходимо было прикрепить спицы с шарнирами, данная операция производится непосредственно на оснастке во избежание перекосов и провисаний мембраны. Для исключения остаточных напряжений в материале основание со спицами крепится на тоже компаунд что и связующее мембраны в отверстие на конце спицы. После формования мембранные отражатели снимаются с оснастки, производится контроль и замер их формы, что представлено на рис. 2.



Рис. 2. Крепление спиц к мембранному отражателю на пентэласт и снятие с оснастки

При последующих испытаниях были выявлены такие преимущества, углеродной ткани перед стеклотканью, как лучшая драпируемость, лучшая способность к пропитке связующим, более стабильная форма.

Данный мембранный отражатель прошел испытания на раскрытие, образование заломов при укладке в транспортное положение и раскрытие в рабочее не выявлено. После испытаний на раскрытие среднеквадратичное отклонение поверхности от расчетной составило 0.3 мм что является приемлемым результатом. Также было выявлено что при искусственном образовании заломов данный композиционный материал способен со временем приходить в свою изначальную форму.

### Библиографические ссылки

1. Archer J. S. High-Performance Parabolic Antenna Reflectors / Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 17, issue 1, 1980, pp. 22–26.
2. C.M. Feng, T.S. Liu. A bionic approach to mathematical modeling the fold geometry of deployable reflector antennas on satellites / Acta Astronautica Volume 103, October–November 2014, Pages 36-44
3. <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-relay/luch-5v>
4. S. Pellegrino. Deployable Membrane Reflectors / Proc. 2nd World Engineering Congress, 2002/7/22, Volume 22, Pages 25
5. <https://icubesat.files.wordpress.com/2018/05/b-4-2-201805291233-lawton.pdf>
6. L.Datashvili, M. Lang, H. Baier, T. Sixt. Membranes for large and precision deployable reflectors. Technical University of Munich, Aerospace dept. Institute of Lightweight Structures, D-85747 Garching, Germany, 2005.
7. L.Datashvili, H. Baier. SMART reflectors / Large Space Apertures Workshop Keck Institute for Space Studies, Caltech-JPL Pasadena, CA, USA 10-11 November, 2008
8. Chris Amend, Michael Nurnberger, Paul Oppenheimer, Steve Koss and Bill Purdy. A Novel Approach for a Low-Cost Deployable Antenna / Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center, May 12-14, 2010

### References

1. Archer J. S. High-Performance Parabolic Antenna Reflectors / Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 17, issue 1, 1980, pp. 22–26.
2. C.M. Feng, T.S. Liu. A bionic approach to mathematical modeling the fold geometry of deployable reflector antennas on satellites / Acta Astronautica Volume 103, October–November 2014, Pages 36-44
3. <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-relay/luch-5v>
4. S. Pellegrino. Deployable Membrane Reflectors / Proc. 2nd World Engineering Congress, 2002/7/22, Volume 22, Pages 25
5. <https://icubesat.files.wordpress.com/2018/05/b-4-2-201805291233-lawton.pdf>
6. L.Datashvili, M. Lang, H. Baier, T. Sixt. Membranes for large and precision deployable reflectors. Technical University of Munich, Aerospace dept. Institute of Lightweight Structures, D-85747 Garching, Germany, 2005.
7. L.Datashvili, H. Baier. SMART reflectors / Large Space Apertures Workshop Keck Institute for Space Studies, Caltech-JPL Pasadena, CA, USA 10-11 November, 2008
8. Chris Amend, Michael Nurnberger, Paul Oppenheimer, Steve Koss and Bill Purdy. A Novel Approach for a Low-Cost Deployable Antenna / Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center, May 12-14, 2010

© Терлецкий Г. С., Тайгин В. Б., 2023

УДК 629.7

## К ВОПРОСУ О КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ, АРМИРОВАННЫХ ПЕКОВЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ И КАРБИДОКРЕМНИЕВЫМИ ВОЛОКНАМИ

А. Н. Тимофеев, П. А. Тимофеев, А. С. Ленковец

Акционерное общество «Композит», 141070,  
Российская Федерация, 141070, Московская область, г. Королёв, Пионерская, 4  
E-mail: 02421@kompozit-mv.ru

*Повышение рабочих температур материалов, применяемых в ракетно-космической технике, является одним из приоритетных направлений на сегодняшний день. Для создания подобных материалов с сохранением механических свойств при температуре необходимы высокотемпературные наполнители, из которых наиболее высокими свойствами обладают неметаллические волокна углерода и карбида кремния.*

*Ключевые слова: композиционный материал, волокна углерода, волокна карбида кремния.*

## ON THE QUESTION OF COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH CARBON AND SILICON CARBIDE FIBERS

A. N. Timofeev, P. A. Timofeev, A. S. Lenkovets

Joint-stock company "Kompozit",  
4, Pionerskaya, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation  
E-mail: 02421@kompozit-mv.ru

*Increasing the operating temperatures of materials used in rocket and space technology is one of the priority areas today. To create such materials with the preservation of mechanical properties at temperature, high-temperature fillers are required, of which non-metallic fibers of carbon and silicon carbide have the highest properties.*

*Keywords: composite material, carbon fibers, silicon carbide fibers.*

Повышение характеристик композиционных материалов безусловно связано с созданием новых волокон и совершенствованием разработанных. Сегодня ведущие зарубежные научные школы активно занимаются разработкой технологий получения высокотемпературных волокон на основе соединений тугоплавких металлов (карбиды, нитриды, оксиды), а также прекурсоров для получения указанных волокон. В тоже время продолжают работы по совершенствованию технологий получения углеродных и карбидокремниевых волокон, которые уже широко применяются в изделиях не только космической и авиационной техники, но и энергетической, химической, нефтяной и газовой отраслях.

В настоящее время в мире существует достаточно большой выбор углеродных волокон, которые по своим физико-механическим и теплофизическим свойствам превосходят лучшие отечественные аналоги. Можно выделить ряд крупных мировых производителей углеродных волокон на основе ПАН-волокна и пека: Mitsubishi RAYON Co. LTD, ZOLTEK, Toray Industries, Inc., HEXCEL, TohoTenax, CYTEC, которые производят углеродные волокна с высоким пределом прочности на растяжение (до 6,9 ГПа для углеродных волокон на основе ПАН-волокна), модулем упругости до 920 ГПа (для углеродных волокон на основе пека) и коэффициентом теплопроводности вдоль оси волокна до 1000 Вт/(м·К) (для углеродных волокон на основе пека).

Анализ теплофизических характеристик углепластиков, армированных различными углеродными волокнами, показывает, что ультравысокомодульные углепластики на основе пековых волокон обладают наибольшей теплопроводностью и совместимы по этому показателю с теплопроводными ме-

таллами (алюминий, медь, серебро) или даже превосходят их, что делает весьма перспективными при проектировании космических аппаратов, теплообменных систем различных изделий.

Таким образом, применение высокопрочных углеродных волокон на основе ПАН для изготовления углепластиков позволяет говорить об изготовлении отдельного материала. Применение высокопроводных волокон позволяет расширять области применения углепластиковых изделий. Применение же карбидокремниевых волокон в металломатричных композиционных материалах повышает границы функциональных свойств данных материалов, поскольку позволяет на 200–300 °С повысить предел работоспособности в сравнении с матричным материалом. Данный факт открывает перед такими композитами широкие перспективы в области энергетического машиностроения. Как известно, газовая турбина является наиболее сложным элементом газотурбинной установки, что обусловлено в первую очередь очень высокой температурой рабочих газов, протекающих через ее проточную часть: температура газов перед турбиной 1150 °С в настоящее время считается «стандартной», и ведущие фирмы, в первую очередь General Electric и Rolls Royce, работают над повышением этого параметра до 1500 °С.

Стремление повысить начальную температуру связано, прежде всего, с выигрышем в экономичности, который она дает. Так повышение начальной температуры с 1100 до 1450 °С дало увеличение абсолютного КПД с 32 до 40%, что привело к экономии топлива в 25 %. И это не предел – задача стоит 1600 °С. Подойти к решению такой задачи возможно только имея керамический композиционный материал, армированный волокнами карбид кремния.

Аналогичные работы в области композиционных материалов, армированных пековыми углеродными и карбидокремниевыми волокнами, проводятся и в ведущем российском центре материаловедения – АО «Композит». В докладе представлены некоторые результаты работ по разработке данных волокон и материалов на их основе.

© Тимофеев А. Н., Тимофеев П. А., Ленковец А. С., 2023

УДК 629.32.4

## УПРУГИЙ ШАРНИРНЫЙ УЗЕЛ С УВЕЛИЧЕННЫМ МОМЕНТОМ СИЛЫ\*

А. В. Тоньшина<sup>1</sup>, Т. А. Шалыгина<sup>1</sup>, А. И. Дудник<sup>1</sup>, А. А. Савенков<sup>1</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: romasanta9403@gmail.com

*В данной работе рассматривается конструкция упругодеформируемого шарнира для раскрытия крупногабаритных космических аппаратов с увеличенным моментом силы, а так же приведены результаты и зависимости измерения момента силы.*

*Ключевые слова: момент силы, упругодеформируемый шарнир, упругая пластина, космический аппарат, конструкция, тензодатчик.*

## ELASTIC HINGE UNIT WITH INCREASED MOMENT OF FORCE

A. V. Tonshina<sup>1</sup>, T. A. Shalygina<sup>1</sup>, A. I. Dudnik<sup>1</sup>, A. A. Savenkov<sup>1</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: romasanta9403@gmail.com

*This paper examines the design of an elastically deformable hinge for deploying large spacecraft with an increased moment of force, as well as the results and dependencies of measuring the moment of force are given.*

*Keywords: moment of force, elastically deformable hinge, elastic plate, spacecraft, structure, strain gauge.*

Раскрытие крупногабаритных космических аппаратов (КА) зачастую проходит с применением электромеханических приводов, что значительно влияет на массу всей конструкции КА. Перспективной заменой электромеханических приводов являются бесприводные шарниры, с использованием упругих пластин, выполненных из углепластика [1]. В работе [2] приводится описание разработанной нами конструкции упругодеформированного шарнира (УДШ), которая исключает недостатки упруголенточных шарниров, а именно неконтролируемость и неравномерность раскрытия, а также минимально нагружает конструкцию КА дополнительной массой [3].

Была найдена зависимость момента силы раскрытия УДШ от толщины упругой пластины, значения которого лежали в диапазоне от 0,05 Н·м до 0,62 Н·м, как показано в табл. 1. Полученные значения момента силы УДШ не позволяют использовать его для развертывания крупногабаритных трансформируемых конструкций космического аппарата.

В настоящей работе представлена оптимизированная конструкция УДШ, обеспечивающая вариативность сборки шарнира с требуемым набором характеристик, а также достижение момента силы развертывания до 7 Н·м. В разработанной конструкции увеличение момента силы развертывания осуществляется за счет увеличения количества исполнительных устройств, выполненных в виде упругих углепластиковых пластин, кратного 3, а не только за счет увеличения их толщины, имеющей узкий диапазон допустимых значений.

Конструкция шарнира показана на рис. 1 в исходном (А) и транспортировочном (Б) состояниях. Шарнир представляет собой два корпусных элемента (1 и 2) с круглыми поверхностями одинакового

\* Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

радиуса, выполненных из пластика PLA. Рис. 1 показывает, что в торцевых частях данных элементов, для установки частей складываемой конструкции, например, штанги, выполнены отверстия, в которые эти штанги устанавливаются. На полукруглых поверхностях располагаются три упругие пластины (5), концы которых фиксируются в карманах корпусов шарнира в разных направлениях, схема соединения пластин с частями корпуса показана на рисунке 2. Пластины фиксируются в карманах корпуса с помощью накладок или уплотнителей. Межосевое расстояние удерживает планка (3), а складывающееся движение обеспечивает вращение корпусов шарнира вокруг осей (4) на угол  $90^\circ$ , траектория движения частей показана на рис. 2.

Таблица 1

## Характеристика УДШ в зависимости от параметров исполнительного устройства

Толщина пружины, мм	Жесткость, Н/м	Момент силы, Н·м
0,56	45	0,14
0,64	65	0,20
0,72	90	0,30
0,80	125	0,43
0,88	158	0,62

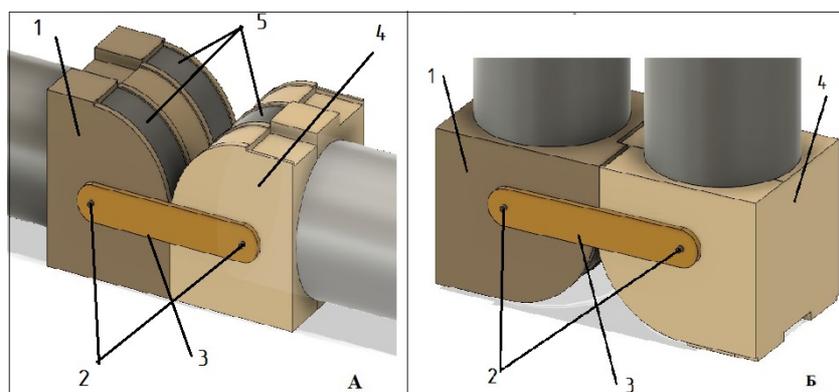


Рис. 1. Модифицированный УДШ:  
А – раскрытое состояние; Б – закрытое состояние; 1, 2 – части корпуса;  
3 – планка; 4 – оси вращения корпусов; 5 – «пакеты» пружин

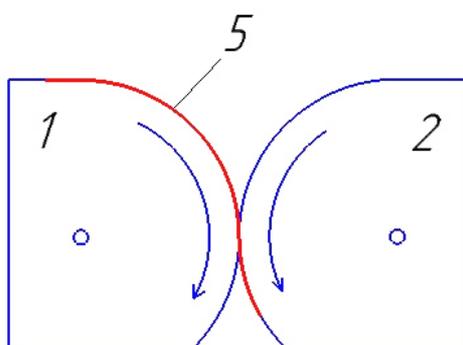


Рис. 2. Схема крепления пружин на корпусных частях шарнира, демонстрация направления движения половин шарнира

В состав упругого шарнира входит набор пружин, состоящий из трех пластин, устанавливаемых по сопряженным плоскостям и работающих параллельно. Однако, разработанная конструкция шарнира обеспечивает установку двух дополнительных наборов пластин с количеством кратным трем,

при этом каждая дополнительная пластина устанавливается поверх другой. В процессе деформирования упругого шарнира с двойным или тройным набором пластин, для предотвращения возникновения локальных мест в структуре пластин, где напряжения превышают допустимые пределы, в карманах предусмотрен контролируемый сдвиг на величину не более 0,2 мм, с противоположной стороны пластины в карманах фиксируются жестко.

Момент силы, развиваемый шарниром, вычислялся как произведение усилия, измеренного тензодатчиком, и межосевого расстояния шарнира равное 153 мм [4]. Метод измерения усилия заключается в том, что один конец тензодатчика фиксировался, а второй конец сдерживал шарнир, когда угол между его половинами был равен  $90^\circ$ [5]. Найдено, что усилие измеренное тензодатчиком для упругого шарнира с одним набором (три пластины) составило 1960 г, момент силы развертывания – 3 Н·м, для шарнира с двойным набором (шесть пластин) – усилие и момент силы составили 3071 г и 4,7 Н·м, соответственно, для шарнира с тройным набором (девять пластин) – усилие и момент силы составили 4700 г и 7,1 Н·м, соответственно. После 10 циклов складывания момент силы развертывания оставался неизменным.

Таким образом разработана конструкция упругого шарнира, обеспечивающая вариативную сборку, позволяющую менять момент силы в диапазоне от 3 до 7,1 Н·м.

### Библиографические ссылки

1. Благодравов А. А. Механические бесступенчатые передачи / А. А. Благодравов. - Екатеринбург: УрО РАН, 2005. - 200 с.
2. Тоньшина А.В., Шалыгина Т.А. Шарнирный узел с применением упругой пластины // материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–11 нояб. 2022, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. С. 148–149.
3. Shape Memory Alloy Mechanisms Hold // ESA:сайт. URL: <http://www.esa.int/est/comp/comp0191.html> (дата обращения: 5.09.2023)
4. Ильин В.А. Учет реального силового взаимодействия в шарнирных узлах крепления при расчете связанного относительного разворота двух летательных аппаратов // Ученые записки ЦАГИ. 1984 г. Т. XV, № 3, С. 17-84.
5. Агаловян Л.А., Геворкян Р.С. Неклассические краевые задачи пластин с общей анизотропией. В сб.: Механика констр. Из композитных материалов. Новосибирск. Наука. 1984. С. 105-110.

### References

1. Blagonravov A. A. Mekhanicheskie besstupenchatye peredachi [Mechanical continuously variable transmissions] / A. A. Blagonravov. - Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. - 200 p.
2. Tonshina A.V., Shalygina T.A. Sharnirnyj uzel s primeneniem uprugoj plastiny Hinge joint using an elastic plate []// materialy XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva (09–11 noyab. 2022, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch. / pod obshch. red. YU. YU. Loginova. p. 148–149
3. Shape Memory Alloy Mechanisms Hold // ESA:сайт. URL: <http://www.esa.int/est/comp/comp0191.html> (date of the application: 5.09.2023)
4. Il'in V.A. Uchet real'nogo silovogo vzaimodejstviya v sharnirnyh uzлах krepneniya pri raschete svyazannogo otnositel'nogo razvorota dvuh letatel'nyh apparatov [Taking into account the real force interaction in hinged attachment points when calculating the associated relative turn of two aircraft] // Uchenye zapiski CAGI. 1984 g. T. XV, № 3, p. 17-84.
5. Agalovyan L.A., Gevorkyan R.S. Neklassicheskie kraevye zadachi plastin s obshchej anizotropiej [Nonclassical boundary value problems for plates with general anisotropy]. V sb.: Mekhanika konstr. Iz kompozitnyh materialov. Novosibirsk. Nauka. 1984. p. 105-110.



**Секция**

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО  
И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

УДК 621.454

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

Э. Ш. Акбулатов<sup>1</sup>, В. П. Назаров<sup>1</sup>, А. Н. Щелканов<sup>2</sup>, Р. В. Коваль<sup>1\*</sup>, Е. В. Герасимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> ООО «Полихром»

Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. Дубровинского, д. 58

\*E-mail: \_ruslan\_@inbox.ru

*Представлены результаты экспериментальной работы по изготовлению ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) методом селективного лазерного плавления. Приведены результаты огневых испытаний напечатанного РДМТ.*

*Ключевые слова: ракетные двигатели малой тяги (РДМТ), аддитивные технологии, огневые испытания.*

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR PRINTING LOW THRUST ROCKET ENGINES

Je. Sh. Akbulatov<sup>1</sup>, V. P. Nazarov<sup>1</sup>, A. N. Shhelkanov<sup>2</sup>, R. V. Koval<sup>1\*</sup>, E. V. Gerasimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC "Polychrome"

58, Dubrovinskogo, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: \_ruslan\_@inbox.ru

*This article presents results of experimental work on the production of a low-thrust rocket engine (LTRE) using the selective laser melting method. The results of fire tests of the printed LTRE are presented.*

*Keywords: low-thrust rocket engines (LTRE), additive technologies, fire tests.*

Развитие и совершенствование ракетно-космической техники в значительной степени обусловлено применением производственных технологий, обеспечивающих изготовление изделий с высокими характеристиками надежности и энергетической эффективности при одновременном снижении показателей материалоемкости и уменьшения длительности производственного цикла. К таким прогрессивным технологиям следует отнести аддитивные технологии, физическая сущность которых заключается в получении деталей методом послойного плавления материала на основе компьютерной 3D-модели изделия в камере специального 3D-принтера, оснащенного лазерным устройством. [1,2]

Применение аддитивных технологий в ракетном двигателестроении требует проведения большого объема научно-исследовательских и экспериментальных работ для подтверждения соответствия нормативным критериям и правилам, установленным в отрасли, а также обязательной сертификации на государственном уровне

В соответствии с программой приоритетных научно-исследовательских работ в СибГУ совместно с индустриальным партнером ООО «Полихром» проводится комплекс экспериментальных работ по апробации и отработке режимов 3D-печати образца камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги" (РДМТ).

Поскольку функциональное назначение данного двигателя-демонстратора заключается в проведении модельных стендовых испытаний без имитации условий космического пространства, предусмотрено использование экологически безопасных компонентов топлива: газообразный кислород O<sub>2</sub>(окислитель) и газообразный метан CH<sub>4</sub>(горючее).

Камера двигателя спроектирована в виде двух моноблоков: смесительной головки и корпуса камеры, соединяемых между собой аргонодуговой сваркой. Возможности SLM технологии позволили выполнить сложную конструкцию смесительной головки без применения сборочных единиц – форсунок, топологическая оптимизация которых обеспечила возможность их аддитивной печати в форме отверстий со струйным и тангенциальным (центробежным) подводом компонентов в зону распыливания и смесеобразования. [3,4]

Процесс печати камеры сгорания РДМТ и смесительной головки выполнен на принтере «Astra 420» производства ООО «Полихром». Технические характеристики обеспечивают реализацию инновационных решений методом динамической модуляции лазерного пятна с возможностью корректировки мощности лазера, что позволяет достичь высоких скоростей построения деталей. 3D-принтер обеспечивает возможность печати 3D-моделей методом послойного селективного лазерного сплавления из порошков цветных металлов, всех видов сталей, никелевых и кобальт-хромовых сплавов, жаростойких аустенитных сплавов типа Инконель.

Подбор режимов начался с серии печати 48 образцов пустотелых клеток одиночными треками для определения оптимального сочетания диаметра пятна лазерного луча (D), скорости сканирования (V) и мощности лазерного излучения (P). Результаты исследовались с помощью микроскопа Insein Li Fung с увеличением  $\times 10-300$ .

Вторым этапом экспериментов являлась печать объёмных образов. К установленным на прошлых опытах параметрам добавлены паттерн (география заполнения) лазерного пучка, скорость холостого хода (JS), внутренний отступ от контура и шаг между треками.

Параметры можно подбирать, основываясь на объёме детали: тонкие участки, с небольшой площадью, возможно печатать относительно быстро без риска образования пористости, а для участков большого скопления материала подбирается подходящий паттерн, который не вызовет перегрева при той же скорости.

Участок критического сечения камеры печатался с использованием альтернативного паттерна печати. Обе модели устанавливались вертикально. От стола к нижней поверхности деталей были установлены поддержки в сочетании с теплоотводами для надёжной фиксации.

В процессе реализации проекта изготовлены четыре камеры РД малой тяги из порошкообразного жаростойкого материала Инконель-718 (ПР-08ХН53БМТЮ) производства ООО «Гранком». Изготовленные изделия прошли термообработку в вакуумной печи при температуре  $t=1060^{\circ}\text{C}$ , послепечатную пескоструйную обработку поверхностей, электрохимическое полирование. На корпус одной из камер электрохимическим методом нанесено никелевое покрытие. Проведен рентгенконтроль камер, виброиспытания и испытания на герметичность методом «Аквариума» по штатной технологии предприятия – партнера АО «Красмаш».

Спроектирован и изготовлен испытательный стендовый комплекс на территории загородного полигона, находящегося в собственности СибГУ. 5 сентября 2023 г. впервые были проведены наземные стендовые испытания ракетного двигателя малой тяги (условное название двигателя «Факел-1»). В соответствии с разработанной и утвержденной циклограммой испытаний проведено пять включений продолжительностью рабочего цикла 1,5 сек. с последующей продувкой магистралей воздухом в течение 180-300 сек. Зафиксировано устойчивое возникновение факела на срезе сопла, стабильная отсечка подачи компонентов топлива и прекращение горения смеси компонентов в камере сгорания. Тягоизмерительным устройством проведено измерение тяги двигателя, которая приблизительно соответствует расчетному значению  $P = 200 \text{ Н}$  (20 кг). С целью гарантированного обеспечения безопасности персонала и стендового оборудования давление подачи газообразных компонентов на входе в двигатель было снижено на 35-40% по сравнению с расчетным давлением в камере сгорания ( $p_K = 1 \text{ МПа}$ ). [5]

Результаты первого испытания в определенной мере подтвердили работоспособность РДМТ, изготовленного методом аддитивных технологий.

Дальнейшее развитие проекта направлено на исследование возможности создания камер ракетных двигателей с регенеративной (проточной) системой охлаждения, изготовление которых будет осуществляться методами аддитивных технологий без применения сложных традиционных технологий формообразования оболочек, пайки, сборки и сварки блоков камеры. Изготовление форсуночной (смесительной) головки также предполагается в виде моноблочной конструкции.

Реализация научно-исследовательского проекта осуществляется при поддержке фонда имени известного государственного и общественного деятеля, предпринимателя Х. М. Совмена.

### Библиографические ссылки

1. Логачева, А. И. Аддитивные технологии изделий ракетно-космической техники : перспективы и проблемы применения // Технология легких сплавов. 2015. № 3. С. 39-44.
2. NASA tests limits of 3D-printing with powerfull rocket engine check [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nasa.gov>. 27.08.2013.
3. Разработка технологии изготовления завихрителя фронтного устройства камеры сгорания перспективного двигателя ПД-14 // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 55. С. 101-102.
4. Перспективы применения аддитивных технологии в производстве сложных деталей газотурбинных двигателей из металлических материалов / С. В. Белов и др. // Аддитивные технологии в российской промышленности : сб. науч. тр. М. : ВИАМ, 2015. С. 101-102.
5. Яцененко В.Г. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / В.Г. Яцененко, В.П. Назаров, А.И. Коломенцев ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с.

### References

1. Logacheva, A. I. Additivnye tehnologii izdelij raketno-kosmicheskoy tehniky : perspektivy i problemy primeneniya // Tehnologija legkih splavov. 2015. № 3. P. 39-44.
2. NASA tests limits of 3D-printing with powerfull rocket engine check [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://nasa.gov>. 27.08.2013.
3. Razrabotka tehnologii izgotovlenija zavihritelja frontovogo ustrojstva kamery sgoranija perspektivnogo dvigatelja PD-14 // Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. № 55. P. 101-102.
4. Perspektivy primeneniya additivnyh tehnologii v proizvodstve slozhnyh detalej gazoturbinnnyh dvigatelej iz metallicheskih materialov / S. V. Belov i dr. // Addivnye tehnologii v rossijskoj promyshlennosti : sb. nauch. tr. M. : VIAM, 2015. P. 101-102.
5. Jacunenکو V.G. Stendovye ispytaniya zhidkostnyh raketnyh dvigatelej : ucheb. posobie / V.G. Jacunenکو, V.P. Nazarov, A.I. Kolomencev ; Sib. gos. ajerokosmich. un-t ; Mosk. aviac. in-t. Krasnojarsk, 2016. 248 p.

© Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Щелканов А. Н., Коваль Р. В., Герасимов Е. В., 2023

УДК 532.5+519.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ОХЛАЖДАЮЩЕМ ТРАКТЕ РДМТ В ПРОГРАММНОМ МОДУЛЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

В. В. Алексеенко\*, В. П. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: mila.khitro@mail.ru

*Представлен гидродинамический расчет гидравлических сопротивлений в охлаждающем тракте камеры РДМТ, изготавливаемой с помощью SLM-печати. Расчеты проведены в программном модуле SOLIDWORKS Flow Simulation.*

*Ключевые слова: РДМТ, SLM-печать, численное моделирование, математическая модель, гидравлические потери в тракте охлаждения.*

## DETERMINATION OF HYDRAULIC RESISTANCE IN THE COOLING PATH OF THE SOLID PROPELLANT MOTOR IN THE SOLIDWORKS FLOW SIMULATION SOFTWARE MODULE

V. V. Alekseenko\*, V. P. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation \*E-mail:  
\*E-mail: mila.khitro@mail.ru

*A hydrodynamic calculation of the hydraulic resistance in the cooling path of the RDMT chamber, obtained using SLM printing, is presented. Calculations are carried out in the SOLIDWORKS Flow Simulation software module.*

*Keywords: LTRE, SLM-printing, numerical simulation, mathematical model, hydraulic losses in the cooling path.*

Разработка охлаждающего тракта для ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) изготовленного на 3Д принтере включает в себя много этапов проектирования [1]. Поскольку для получения заготовки необходима 3Д модель, большая часть конструкторской работы проводится в системах автоматизированного проектирования. В случае данного проекта инструментом послужит программный комплекс SolidWorks.

Одной из актуальных задач проекта стало моделирование течения рабочего тела в полости охлаждающего тракта РДМТ, проведение вычислений в этой области могут дать предварительные результаты и параметры расчетной области охлаждающего тракта [2]. Для проведения параметрического моделирования потока будет использован программный модуль SOLIDWORKS Flow Simulation. SOLIDWORKS Flow Simulation – это программа использует метод конечного объема (FVM). Она позволяет моделировать эффекты потока, теплообмена и гидродинамических сил, которые критически важны для успешного проектирования и использовать полученные результаты для оптимизации [3-5].

В данной работе представлен гидродинамический расчет гидравлических сопротивлений в охлаждающем тракте РДМТ. В качестве модели была использована камера двигателя с меридиональными ребрами и коллектором подвода в области критического сечения (рис. 1). Камера двигателя (поз. 1) представляет собой оболочку вращения и состоит из огневой стенки (поз. 2) и рубашки (поз. 3), связанных между собой ребрением (поз. 4). Геометрические размеры определены на основе термодинамического расчета и расчета охлаждения. Коллекторы располагаются на рубашке следующим образом: входной (поз. 5) – в области критического сечения, выходной (поз. 6) – в области цилиндрической части камеры. Подводы для поступления жидкости в тракт охлаждения находятся в стадии раз-

работки из-за особенностей 3Д-печати, в данной работе они представляют собой цилиндрические бобышки диаметром 10 мм с отверстием 7 мм.

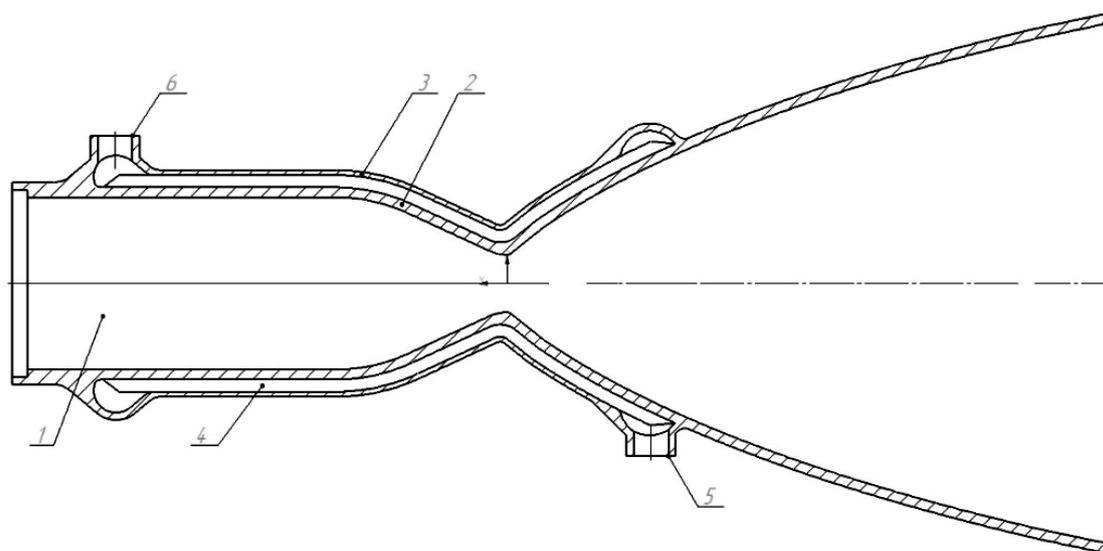


Рис. 1. Эскиз камеры двигателя

В пакете Solidworks Flow Simulation был создан проект расчета, где были заданы граничные условия: массовый расход на входе в коллектор  $m' = 0,1$  кг/с, статическое давление на выходе из коллектора  $P = 101325$  Па. Гидравлические потери были представлены в виде потерь давления в охлаждающем тракте между входом и выходом из коллектора. Расчеты проводились путем задания поверхностных целей на заглушках коллектора, результатом является цель-выражение – разница полных статических давлений. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты выполненные SOLIDWORKS Flow Simulation**

Среднее полное давление на входе[Па]	109298,23
Среднее полное давление на выходе[Па]	110022,42
Цель-выражение[Па]	724,19

Картина течения рабочей среды(воды) в тракте охлаждения представлена на рис. 2.

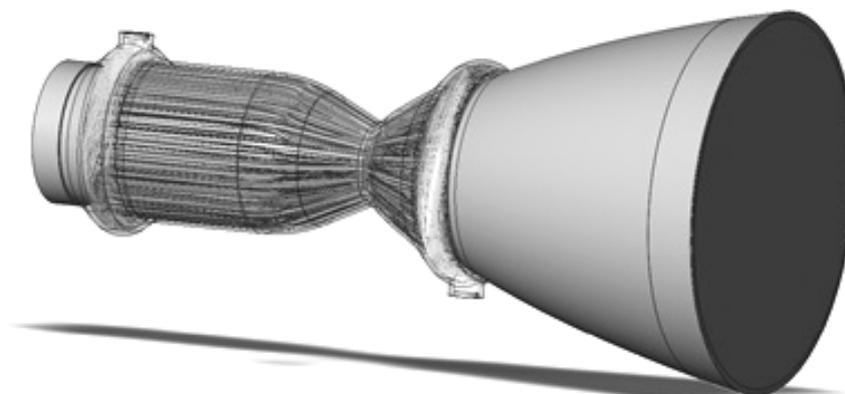


Рис. 2. Визуализация расчетов

Таким образом, моделирование в программной среде Solidworks Flow Simulation может быть использовано на разных этапах конструкторских работ, как для проведения расчетов, так и для визуализации рабочих процессов в камере РДМТ.

### Библиографические ссылки

1. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1989. 464 с.
2. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 488 с.
3. Бабкина Л. А., Сорокин Д. В. Моделирование течения жидкости и газа в пакете SolidWorks Flow Simulation. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2012. 72 с.
4. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М. : ДМК Пресс, 2015. 562 с.
5. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

### References

1. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. Teoriya raketnykh dvigateley [Rocket engine theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 464 p.
2. Dobrovolskii M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid propellant rocket engines]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2005, 488 p.
3. Babkina L. A., Sorokin D. V. *Modelirovanie techeniya zhidkosti i gaza v pakete SolidWorks Flow Simulation* [Simulation of liquid and gas flow in the SolidWorks Flow Simulation package]. Krasnoyarsk, Sib. St. Univ. Publ., 2012, 72 p.
4. Alyamovskii A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]. Moscow, DMK Press Publ., 2015, 562 p.
5. Alyamovskii A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. *SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike* [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. St.Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 800 p.

© Алексеенко В. В., Назаров В. П., 2023

УДК 629.036

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ПРИВТУЛОЧНЫХ ПОЛОСТЕЙ  
ДВУХОПОРНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ НА ПАРАМЕТРЫ  
ОСЕВОГО МНОГООТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА**

Е. С. Горячкин, И. А. Кудряшов\*, В. М. Зубанов, А. И. Щербань

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: ivan.kudryash1337@gmail.com

*Работа посвящена исследованию влияния привтулочных полостей на характеристики осевого компрессора.*

*Ключевые слова: осевой компрессор, CFD-моделирование, лопаточные машины, характеристики, полости.*

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE CONFIGURATION  
OF THE HUB CAVITIES OF SHROUDED GUIDE VANE ON THE PARAMETERS  
OF AN AXIAL MULTISTAGE COMPRESSOR**

E. S. Goryachkin, I. A. Kudryashov\*, V. M. Zubanov, A. I. Shcherban

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: ivan.kudryash1337@gmail.com

*The work is devoted to the study of the influence of bushing cavities on the performance of axial compressor.*

*Keywords: axial compressor, CFD modeling, turbomachines, characteristics, cavities.*

Одним из ключевых элементов газотурбинного двигателя (ГТД) является компрессор. Эффективность компрессора во многом определяет эффективность всего двигателя в целом [1]. Детализация расчетной модели важна для правильного прогнозирования характеристик компрессора. На начальных этапах проектирования расчетная модель обычно не включает в себя точную конструкцию таких элементов как междисковые полости, что существенно уменьшает расчетное время и объем модели, однако это сказывается на значениях расчетных характеристик. Такой расчет может привести к завышению значений таких параметров как КПД, запасы газодинамической устойчивости (ГДУ) и других.

Объектом исследования является рабочий процесс в междисковых полостях компрессора. Предметом исследования является многоступенчатый осевой компрессор наземного промышленного ГТД. Компрессоры подобного типа характеризуются сложной пространственной картиной течения потока, наличием отрывов и вихрей.

Целью работы является оценка влияния конфигурации междисковых полостей на характеристики и основные параметры осевого компрессора и подбор оптимальной конфигурации, которая позволит достигнуть высоких значений параметров компрессора.

Для предварительной оценки были исследованы шесть конфигураций полостей на модели входного блока компрессора, включающего первые две ступени. Конфигурации представлены на рис. 1–6. Конфигурация № 1 является базовой.

Численный расчёт характеристик компрессора был выполнен с использованием CFD программного комплекса NUMECA FINE/Turbo в трёхмерной постановке с настройками расчетной модели, соответствующим существующим рекомендациям [2].

При расчетах использовалась модель турбулентности k-epsilon (Extended Wall Function).

В качестве граничных условий заданы: на входе – равномерное радиальное распределение полного давления и полной температуры, осевое направление потока; на выходе – значение статического давления на втулочном сечении с учетом радиальной неравномерности потока.

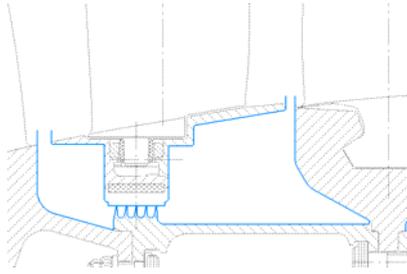


Рис. 1. Конфигурация № 1

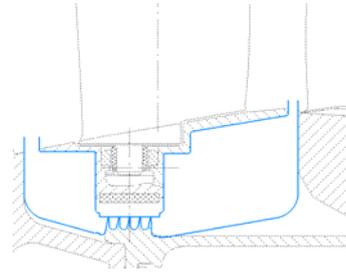


Рис. 2. Конфигурация № 2

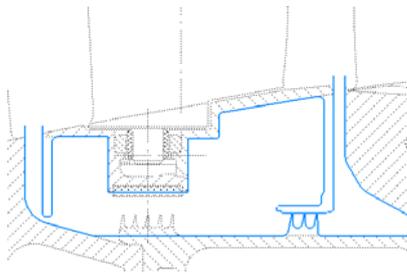


Рис. 3. Конфигурация № 3

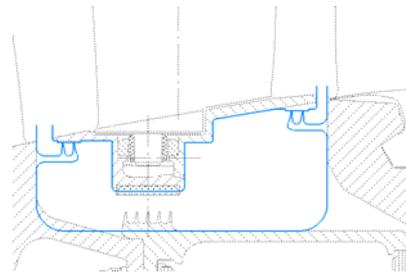


Рис. 4. Конфигурация № 4

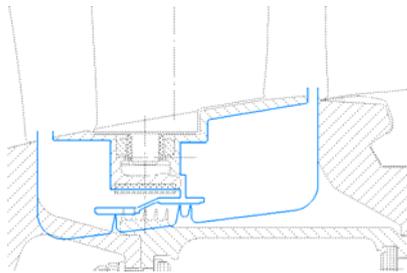


Рис. 5. Конфигурация № 5

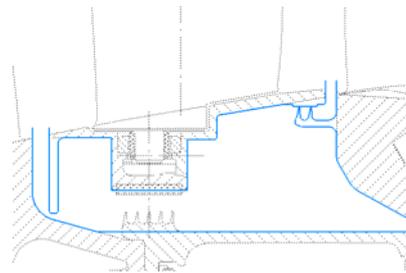


Рис. 6. Конфигурация № 6

В результате расчета входного блока значения КПД снизились по сравнению с расчетом с гладкими трактами без учета междисковых полостей. Значения отклонений представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения  $\Delta\eta$  входного блока при различных конфигурациях междисковых полостей**

Исследуемая конфигурация	Значение $\Delta\eta$ , %
№1	0,11
№2	0,17
№3	0,14
№4	0,31
№5	0,22
№6	0,23

После проведения расчета входного блока были выбраны конфигурации №1, №3 и №4 для исследования их влияния характеристики всего шестиступенчатого компрессора. В исследуемом компрессоре помимо полостей были заданы отборы рабочего тела перед первым и пятым рабочими колесами, а также перед последним направляющим аппаратом.

Полученные в результате расчета характеристики сравнивались с характеристиками компрессора на гладких трактах. Результаты сравнения представлены на рис. 7–8.

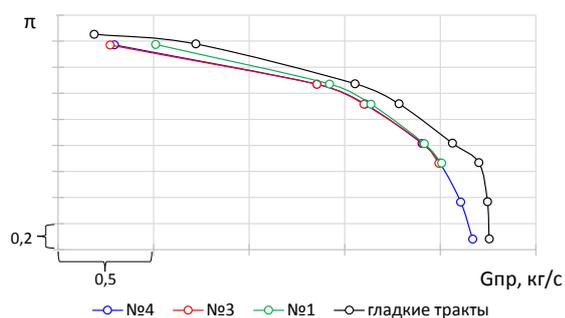


Рис. 7. Характеристика степени повышения давления от расхода

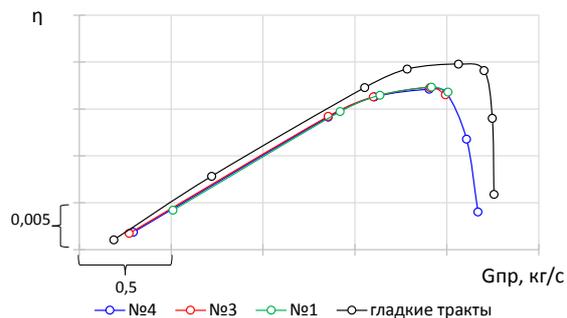


Рис. 8. Характеристика КПД от расхода

Значения степени повышения давления снизились относительно значения, полученного для случая с гладкими трактами, на 0,079, 0,083, 0,082 для конфигураций №1, №3 и №4 соответственно.

Полученные значения КПД для полного компрессора меньше КПД компрессора с гладкими трактами на 0,245% для конфигурации №1, 0,249% для конфигурации №3 и 0,267% для конфигурации №4.

Тенденция влияния конфигураций на характеристики входного блока подтвердилась на значениях расхождений параметров в полноразмерном компрессоре. Наиболее близкие к модели с гладкими трактами значения показала модель с конфигурацией междисковых полостей №1 и №3.

Дальнейшим направлением исследования является различное профилирование лабиринтного уплотнения для конфигураций №1 и №3.

### Библиографический список

1. Кулагин, В. В., Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. 3-е изд. В 2 кн. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термозодинамический анализ. [Текст] / В. В. Кулагин, В. С. Кузьмичев М.: Машиностроение, 2013. 336 с.
2. Goryahkin E., Popov G., Baturin O., et al. Three-stage low pressure compressor modernization by means of optimization methods. ASME Turbo Expo, 2015, no. GT2015-43384, V02CT45A017

### References

1. Kulagin, V. V., Teoriya, raschet i proektirovanie aviacionnih dvigateley i energeticheskikh ustanovok: uchebink. 3-e izd. V 2 kn. Kn. 1. Osnovy teorii GTD. Rabochii process i termogazodinamicheskii analiz [Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants: textbook. 3-th ed. In 2 vols. 1. Fundamentals of GTE theory. Operation process and thermo-gas-dynamic analysis], Moscow, Mashinostroenie, 2013, 336 p.
2. Goryahkin E., Popov G., Baturin O., et al. Three-stage low pressure compressor modernization by means of optimization methods. ASME Turbo Expo, 2015, no. GT2015-43384, V02CT45A017

© Горячкин Е. С., Кудряшов И. А., Зубанов В. М., Щербань А. И., 2023

УДК 621454.2

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО  
И ДИНАМИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ  
В ПОЛОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ЖРД**

Н. А. Данилов, Е. В. Фалькова, А. А. Арнгольд, Э. С. Манохина, А. А. Зуев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*Предложена модель распределения динамического и температурного пограничных слоев с конвективной составляющей, необходимая для аналитического определения локального коэффициента теплоотдачи в полостях вращения турбин ЖРД.*

*Ключевые слова: Модель, теплопроводность, температура, коэффициент теплоотдачи.*

**INTEGRAL MODEL OF TEMPERATURE AND DYNAMIC BOUNDARY  
LAYER DISTRIBUTION FOR COMBUSTION PRODUCTS  
IN ROTATION CAVITIES OF GAS TURBINES OF ZHD**

N. A. Danilov, E. V. Falkova, A. A. Arngold, E. S. Manokhina, A. A. Zuev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*A model of the distribution of dynamic and temperature boundary layers with a convective component, necessary for the analytical determination of the local heat transfer coefficient in the cavities of the rotating turbines of liquid-propellant rocket engines, is proposed.*

*Keywords: Model, thermal conductivity, temperature, heat transfer coefficient.*

При проектировании ТНА ЖРД важным аспектом является учет особенностей теплоотдачи в проточных частях. Это актуальная задача, которая необходима для обеспечения требуемых энергетических параметров, надежности и работоспособности ТНА.

Существует несколько методов учета теплоотдачи в проточных частях ТНА ЖРД. Один из таких методов – это метод расчета коэффициента теплоотдачи на основе принципа подобия. Он основан на сравнении физических параметров двух разных систем, одна из которых является моделью, а другая – основным объектом. Второй метод – это метод численного моделирования, который позволяет проектировать проточные части ТНА ЖРД, используя компьютерное моделирование для расчета коэффициента теплоотдачи. Еще одним методом является экспериментальный подход, который включает в себя проведение физических экспериментов на реальных проточных частях ТНА ЖРД для определения их теплоотдачи и других параметров.

Для аналитического решения уравнения баланса энергии температурного пограничного слоя (ТПС) требуется знание граничных условий и параметров, таких как скорость потока, температура поверхности и теплопроводность материала. Эти параметры могут быть получены из экспериментальных данных или численного моделирования. Результатом аналитического решения уравнения баланса энергии для ТПС являются температурные профили в пограничном слое и коэффициент теплоотдачи на поверхности. Эти результаты могут быть использованы для оптимизации проектирования ТНА и повышения их эффективности. При проектировании проточных частей узлов и агрегатов ТНА ЖРД необходимо учитывать изменение температуры потока рабочего тела по длине рабочего канала, так как параметр вязкости является функцией температуры и

определяет режим течения и потери, включая дисковое трение и гидродинамические потери в проточной части.

Интегральное соотношение уравнения энергии используется для определения локального коэффициента теплоотдачи в полостях вращения турбин ЖРД при реализации потенциального и вихревого вращательного течения. Для случая  $Pr < 1$  выражение толщины потери энергии температурного пограничного слоя может быть определено с применением интегральной модели распределения температурного и динамического пограничных слоев. Интегральная модель распределения температурного и динамического пограничных слоев – это математическая модель, которая описывает процессы теплообмена и динамики газовых потоков в пограничном слое.

Пограничный слой формируется на поверхности твердого тела, когда поток газа движется над ней. Тепло передается от поверхности твердого тела в пограничный слой за счет конвекции и теплопроводности.

При  $Pr > 1$  температурный пограничный слой меньше динамического (рис. 1). Тепловой поток от поверхности теплообмена может осуществляться за счет двух механизмов: теплопроводности или турбулентного переноса. При турбулентном течении скорость турбулентного переноса тепла и импульса значительно превышает скорость молекулярного переноса и поэтому молекулярным переносом можно вообще пренебречь. При критерии Прандтля, близком к единице или более высокому, преобладает турбулентный механизм переноса тепла, а молекулярным переносом можно пренебречь [1].

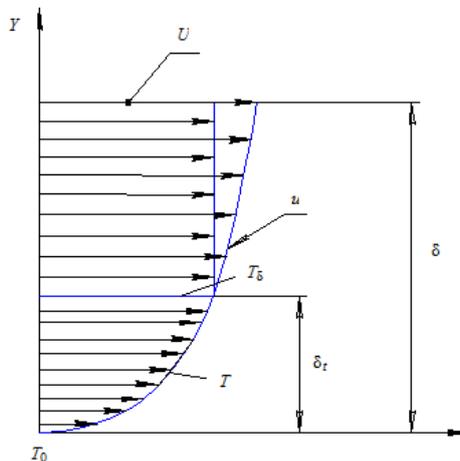


Рис. 1. Разработанная модель температурного и динамического пограничных слоев

Так как коэффициенты турбулентного переноса значительно выше коэффициентов молекулярного переноса, в дифференциальных уравнениях движения и энергии можно пренебречь кинематическим коэффициентом вязкости и коэффициентом теплопроводности в отличие от коэффициентов турбулентного переноса импульса и тепла [1].

Основной механизм переноса тепла реализуется за счет переноса объема массы рабочего тела вдоль оси Y, вызванного изменением скорости в пограничном слое. Учитывая существующее подобие распределения температурного и скоростного профилей в пограничном слое (ПС) при критерии Прандтля, равным единице, когда безразмерные профили скорости и температуры идентичны, примем следующую модель распределения температурного и динамического ПС: распределение температурного ПС в границах толщины температурного слоя  $\delta_t$  совпадает с профилем функции скорости ПС. Вне границы температурного слоя  $\delta_t$  температура потока не изменяется и равна температуре потока в ядре течения, но функция скорости продолжает изменяться до достижения толщины  $\delta$ , далее принимает параметры ядра [2-4].

$$St = \frac{1}{Pr^{\frac{m+1}{m+3}}} \left( \frac{2J\varepsilon}{\alpha_l^{m-1} Re} \frac{(m+1)}{(m+3)} \right)^{\frac{2}{m+3}} \times \left( \frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x} \right)^{\frac{2(m+3)-4}{(m+1)(m+3)}}.$$

Полученное выражение для определения коэффициента теплоотдачи в виде критерия Стантона необходимо для расчета и анализа энергетических параметров, при проектировании проточных частей и конструктивных элементов ТНА ЖРД.

### Библиографические ссылки

1. Кейс, В. М. Конвективный тепло- и массообмен : пер. с англ. / В.М. Кейс. М.: Энергия, 1972. 448 с.
2. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя с конвективной составляющей в полостях вращения ТНА ЖРД / А.А. Зуев, В.Ю. Пиунов, В.П. Назаров, А.А. Арнгольд // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19. №2. С. 30-44. DOI: 10.14529/engin190203
3. Кишкин А.А., Зуев А.А., Леонов В.П. Локальная теплоотдача в граничных условиях турбомашин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1(658). С. 3-10. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-1-3-10
4. Зуев А.А., Назаров В.П., Арнгольд А.А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 99-115.

### References

1. Keys, V. M. Convective heat and mass transfer : translated from English / V. M. Keys. M.: Energia, 1972. 448 с.
2. Determination of the local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with a convective component in the rotation cavities of the TNA of an LND / A.A. Zuev, V.Y. Piunov, V.P. Nazarov, A.A. Arngold // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mashinostroenie. 2019. T. 19. №2. C. 30-44. DOI: 10.14529/engin190203.
3. Kishkin, A.A.; Zuev, A.A.; Leonov, V.P. Local heat transfer in the boundary conditions of the turbomachines (in Russian) // Izvestiyavysheebrazovaniyavysheebrazovaniya. Mashinostroenie. 2015. № 1(658). С. 3-10. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-1-3-10
4. Zuev, A.A.; Nazarov, V.P.; Arngold, A.A. Determination of the local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer in the rotation cavities of gas turbines // Bulletin of Moscow Aviation Institute. 2019. T. 26. № 2. С. 99-115.

© Данилов Н. А., Фалькова Е. В., Арнгольд А. А., Манохина Э. С., 2023

УДК 621.438

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАТЕ ТУРБОМАШИН

Н. А. Данилов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*Рассмотрены особенности течения вдоль осевой хорды профиля лопатки турбомашин. Приведены влияющие факторы на эффективность рабочего колеса осевой газовой турбины. Представлены теоретические подходы, которые необходимо учитывать при проектировании рабочих колес и моделировании энергетических параметров газовых турбин.*

*Ключевые слова: пограничный слой, диффузность, криволинейный канал, давление.*

## PECULIARITIES OF FLOW IN THE INTERBLADE ROPE OF TURBOMACHINES

N. A. Danilov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*Peculiarities of flow along the axial chord of turbomachine blade profile are considered. Influencing factors on the efficiency of the impeller of the axial gas turbine are given. Theoretical approaches to be taken into account when designing impellers and modelling energy parameters of gas turbines are presented.*

*Keywords: boundary layer, diffusivity, curvilinear channel, pressure.*

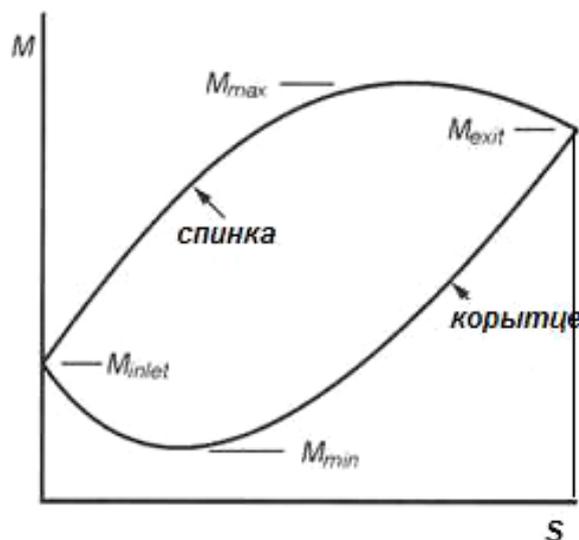
При движении газа в криволинейных каналах возникают специфические явления. Скорости движения в канале малы по сравнению со скоростью звука, так что влиянием сжимаемости можно пренебречь. В связи с тем, что частицы газа движутся по криволинейным траекториям, давление на внешней (вогнутой) и внутренней (выпуклой) стенках канала оказывается разным и различно меняется в направлении движения. Так как частицы ядра потока под действием центробежных сил оттесняются к внешней стенке, то давление вдоль возрастает по сравнению с давлением входящего потока, а вдоль – уменьшается [1]

Чтобы увеличить значение нагрузки на профиль необходимо ускорять поток на спинке до максимальной величины как можно быстрее, а на корытце как можно позднее. При этом появляются большие градиенты давлений. Как правило на спинке скорость в горле больше, чем в выходной кромке. Это свидетельствует о наличии диффузорного участка за ним. Наличие местных диффузорных зон может спровоцировать рост подъемной силы. Но так как диффузорный поток склонен к отрывам, то чрезмерное торможение на корытце и спинке может привести к отрыву пограничного слоя, что существенно увеличит потери. Поэтому вводят понятие коэффициента диффузорности. Величина предельной диффузорности, как правило, не превышает 0,2.

С преобладанием эффекта диффузорности поток оторвется со спинки, то отрыв не сможет располагаться до выхода из-за выпуклости спинки и малого расстояния до выхода. Потери будут существенны, а угол потока на выходе будет больше, чем требуется то есть поток недоповернут, и работа будет меньше расчетной. Отрыв неблагоприятно повлияет на работу последующей ступени. При отрыве пограничного слоя на корытце вблизи входной кромки он успеет локализоваться и негативное влияние будет меньшим.

Проектирование лопатки, которая была бы рассчитана на максимально возможную нагрузку не приведет к желаемому результату. Так как следует помнить, что получение большой нагрузки сопровождается большими потерями из-за больших градиентов давления и больших углов поворота потока.

При возрастании нагрузки на лопатку, число лопаток уменьшается, интервал между лопатками растет, снижаются потери трения и кромочные потери. Но для получения заданной нагрузки нужно увеличивать диффузорность, что увеличивает потери. Оптимально возможная нагрузка лежит в месте баланса диффузорных потерь и потерь на трение.



Типовая зависимость изменения числа Маха  $M$  вдоль осевой хорды профиля лопатки осевой турбины

Существует параметр Цвайфеля с помощью которого оценивают нагрузку на профиль, возникающий на лопатке, если бы на всем протяжении спинки установилось давление равное входному, а на всем корытце – равное выходному.

В эскизном проектировании параметр Цвайфеля это простой и эффективный метод оценить число лопаток в первом приближении. Высокие значения параметра Цвайфеля приводят к увеличению потерь, что особенно актуально для периферийных сечений из-за вторичных потерь и потерь в зазоре. Для уменьшения потерь нужно увеличивать шаг решетки. Для сохранения нагрузки на профиль, нужно увеличивать хорду. Это в свою очередь увеличивает вторичные потери. Для их компенсации нужно увеличивать высоту лопаток. Лопатки становятся более тяжелыми, растут напряжения в них.

Если уменьшать число лопаток без изменения хорды и высоты лопаток, то для сохранения работы, нужно увеличивать нагрузку на профиль. А это увеличивает потери связанные с диффузорностью, вторичные потери и утечки.

В отечественной практике для оценки числа лопаток профиля применяется величина относительного шага.

Профиль скорости имеет характерный турбулентный профиль. Движение частиц рассчитывалось для эквивалентных диаметров частиц от 10 до 500 мкм. Частицы малого размера (10 мкм) отслеживают линии тока газовой фазы и со стенками практически не взаимодействуют. Более крупные частицы диаметром 100 мкм соударяются со стенкой трубы после изгиба. Большие частицы (300 и 500 мкм) имеют более прямые траектории на участке изгиба трубы и соударяются со стенкой с высокой интенсивностью. Низкоскоростные частицы в 300 мкм могут захватываться вихревым течением газа и находиться в нем некоторое время. Крупные частицы диаметром 500 мкм почти все проникают через вихрь. Только частицы из пристеночной области с очень малыми скоростями совершают в вихре возвратное движение.[2]

#### Библиографические ссылки

1. М. Е. Дейч. Движение газа в криволинейных каналах. Техническая газодинамика Изд 2-е, переработал М.Л. Госэнергоиздат. 1961. Стр 299-313.
2. А. А. Дыбрин. Моделирование течения двухфазной смеси в криволинейных каналах газопровода. Интеллектуальные системы в производстве. 2013. Стр 18-23.

#### References

1. M. E. Deitsch. Gas motion in curvilinear channels. Technicheskaya gazodynamika Izd 2nd, revised M.L. Gosenergoizdat. 1961. Pages 299-313.
2. A. A. Dybrin. Modelling of flow of a two-phase mixture in curvilinear channels of a gas pipeline. Intellectual systems in production. 2013. Pp 18-23.

УДК 621454.2

## ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И ОТКЛОНЕНИЯ НАПОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Н. А. Данилов, А. А. Арнгольд

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*Предложена методика и алгоритм учета влияния технологических, геометрических отклонений и режимных параметров на напорную характеристику центробежного насоса ТНА. Учтены влияющие параметры и дан анализ влияния на напор отклонений различных геометрических размеров.*

*Ключевые слова: центробежный насос, напор, энергетические параметры.*

## PHYSICAL FORMULATION OF THE PROBLEM OF DETERMINING THE VALUE AND HEAD DEVIATION OF A CENTRIFUGAL PUMP

N. A. Danilov, A. A. Arngold

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*The method and algorithm of taking into account the influence of technological, geometrical deviations and mode parameters on the head characteristic of TPA centrifugal pump are proposed. The influencing parameters are taken into account and the influence of deviations of different geometrical dimensions on the head is analysed.*

*Key words: centrifugal pump, head, energy parameters.*

Центробежные насосы ТНА ЖРД необходимы для подачи компонентов топлива. Важным параметром, определяющим эффективность работы, является напор. Однако в процессе эксплуатации возможны отклонения от заданных значений напора, что может привести к отказам, невыполнению программы полета и снижению производительности насоса. В данной работе рассмотрена физическая постановка задачи определения величины и отклонения напора центробежного насоса на основе основных принципов гидродинамики и учитываются особенности протекаемых физических процессов в отдельных элементах ТНА ЖРД. Большой вклад в разработку расчетных методик различных конструктивных элементов и узлов центробежных насосов ТНА ЖРД внесли следующие авторы [1-5].

Предложена методика расчета и анализа энергетических параметров для центробежных насосов с учетом отклонения геометрических параметров основных конструктивных элементов

Рассчитывается насос с центробежным колесом и двумя щелевыми уплотнениями, принципиальная схема и основные геометрические параметры которого приведены на рис. 1.

Величина напора, создаваемого центробежным насосом, с учетом потерь, определяется выражением:

$$H = H_m - L_{\text{кол}} - L_{\text{отв}},$$

где  $H_m$  – теоретический напор;  $L_{\text{кол}}$  –  $L_{\text{отв}}$  – потери в колесе и отводе соответственно;

Потери напора по данным работы определяется соотношениями:

$$L_{\text{кол}} = 0,32U_2^2 \bar{D}_1^2,$$

$$L_{\text{отв}} = 0,1K_z(1 - q_p)^2 U_2^2,$$

где  $q_p$  – расходный параметр:

$$q_p = \frac{2(Q + Q_{ym})}{D_2 b_2 (\pi D_2 - Z \delta_2) \omega \operatorname{tg} \beta_{2,l}}.$$

$\bar{D}_1 = \frac{D_1}{D_2}$  – относительный диаметр колеса,  $\beta_{2,1} \leq 0,7$ ;  $Z$  – число лопаток;  $Q + Q_{\text{ут}} = \frac{Q}{2_p}$  – расход через рабочее колесо с учетом утечек;  $2_p$  – расходный КПД насоса;  $K_z$  – коэффициент, учитывающий влияние конечного числа лопаток.

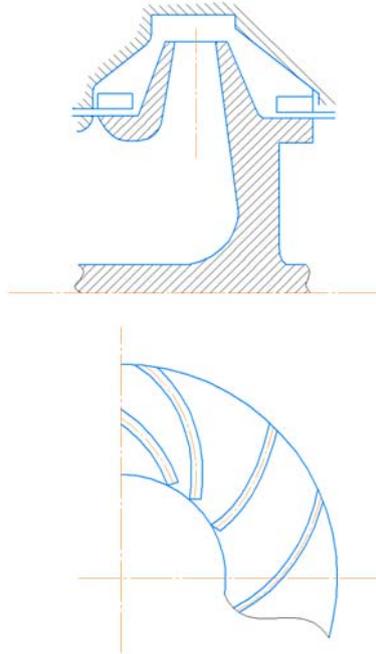


Рис. 1

Тогда выражение для напора насоса запишется в виде:

$$\delta H = \pm \sqrt{\delta H_{(D_2)}^2 + \delta H_{(b_2)}^2 + \delta H_{(\sigma_2)}^2 + \delta H_{(\beta_2)}^2 + \delta H_{\omega}^2 + \delta H_Q^2}.$$

Для учета конечного числа лопаток используется формула работы:

$$K_z = \frac{1}{1 + \frac{\pi \sin \sin \beta_{2,1}}{2z + (1 - \bar{D}_1^2)}}.$$

Расход утечек через щелевые уплотнения определяется по методике или путем задания расходного КПД насоса.

Гидравлический КПД насоса, необходимый для расчета утечек, определяется с использованием методики. Уравнение можно представить как функцию технологических отклонений геометрических и режимных параметров, отклонения которых оказывают наибольшее влияние на напор насоса:

$$H = f(D_2, b_2, \sigma_2, \beta_{2,1}, \omega, Q).$$

При отработке программы установлено, что влияние отклонений диаметра входа в колесо и расхода утечек несущественно, поэтому ими можно пренебречь. С учетом отклонений, влияющих на напор параметров, относительное отклонение напора центробежного насоса определится выражением:

$$\delta H = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial D_2} \frac{D_2}{H} \delta D_2\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial b_2} \frac{b_2}{H} \delta b_2\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \beta_{2,1}} \frac{\beta_{2,1}}{H} \delta \beta_{2,1}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \sigma_2} \frac{\sigma_2}{H} \delta \sigma_2\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \omega} \frac{\omega}{H} \delta \omega\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial Q} \frac{Q}{H} \delta Q\right)^2}.$$

где коэффициенты влияния соответствующего параметра на изменение напора имеют вид:

$$K_{D_2} = \frac{\partial H}{\partial D_2} * \frac{D_2}{H}; K_Q = \frac{\partial H}{\partial Q} * \frac{Q}{H},$$

а относительные отклонения конструктивных и режимных параметров определяются как отношения:

$$\delta D_2 = \frac{\Delta D_2}{D_2}; \delta b_2 = \frac{\Delta b_2}{b_2}; \delta Q = \frac{\Delta Q}{Q},$$

где  $\Delta D_2, \dots, \Delta Q$  – половина поля технологического допуска на данный параметр;  $D_2, \dots, Q$  – номинальное значение влияющего параметра.

Выражение (7) можно представить в форме влияющих на отклонение напора параметров:

$$\delta H = \pm \sqrt{\delta H_{(D_2)}^2 + \delta H_{(b_2)}^2 + \delta H_{(\sigma_2)}^2 + \delta H_{(\beta_2)}^2 + \delta H_{\omega}^2 + \delta H_Q^2}.$$

Представленная методика позволяет определять напор центробежного насоса с учетом технологических, геометрических отклонений и режимных параметров.

### Библиографические ссылки

1. Савчин Д.А., Назаров В.П. К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2023. № 1 (50). С. 42-46.
2. Савчин Д.А., Назаров В.П. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5. № 1. С. 95-10.
3. Торгашин А.С., Жуйков Д.А., Назаров В.П., Бегисhev А.М. СПОСОБ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КАВИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НАСОСОВ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ. Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23. № 3. С. 498-507.
4. Дубынин П.А., Толстопятов М.И., Зувев А.А., Черненко В.В. К МЕТОДУ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНЫХ БУСТЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24. № 2. С. 325-334.
5. Краев М.В., Краева Е.М. ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННОЙ КАВЕРНЫ В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2013. № 2. С. 47-51.

### References

1. Savchin D.A., Nazarov V.P. Towards SETTING THE CHALLENGE OF A MATHEMATICAL MODEL OF SCHNEKOCENTROBEZH PUSES OF LIQUID RACETE MOTORCIES. Bulletin of Sholom-Aleichem Priamur State University. 2023. № 1 (50). С. 42-46.
2. Savchin D.A., Nazarov V.P. DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE MODEL OF PROCESS OF PREPARATION OF CAPACITY CHARACTERISTICS OF CENTRE-BEACH PUMPS OF LIQUID RACKET MOTORS. Omsk Scientific Bulletin. Series of Aviation, Rocket and Power Engineering. 2021. Т. 5. № 1. С. 95-10.
3. Torgashin A.S., Zhuikov D.A., Nazarov V.P., Begishev A.M. PROCESSING PROCESSING OF RESULTS OF CAVITATION TESTING OF TURBONASOPS PUMPS WITH THE PURPOSE OF GETTING APPROXIMISING FUNCTION. Siberian Aerospace Journal. 2022. Т. 23. № 3. С. 498-507.
4. Dubynin P.A., Tolstopiatov M.I., Zuev A.A., Chernenko V.V.. TOWARDS THE METHOD OF CALCULATION OF BASIC CHARACTERISTICS OF ADVANCED BOOSTER ELECTRIC PUMP UNITS OF LIQUID ROCKET ENGINES. Siberian Aerospace Journal. 2023. Т. 24. № 2. С. 325-334.
5. Kraev M.V., Kraeva E.M. DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF CAVITATION CAVERY IN THE WORKING WHEEL OF A CENTROBEACH PUPPER. Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Aeronautical Engineering. 2013. № 2. С. 47-51.

© Данилов Н. А., Арнгольд А. А., 2023

УДК 621.438:621.675.001.2

## ПРОТОТИПИРОВАНИЕ СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ТНА ЖРД

Д. А. Жуйков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: blskqkqnb6y8@mail.ru

*Рассмотрен подход к построению симуляционной модели экспериментального стенда ТНА ЖРД с применением современных информационных технологий быстрого прототипирования для получения характеристик агрегата.*

*Ключевые слова: прототипирование, симуляция, экспериментальный стенд, ТНА, ЖРД.*

## PROTOTYPING OF A SIMULATION MODEL OF THE EXPERIMENTAL STAND OF TNA LPRE

D. A. Zhuikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: blskqkqnb6y8@mail.ru

*The approach to the construction of a simulation model of the experimental stand of the TNA LRE with the use of modern information technologies of rapid prototyping to obtain the characteristics of the unit is considered.*

*Keywords: prototyping, simulation, experimental stand, fuel turbopump, liquid propellant engine.*

На этапе разработки приложения-цифрового двойника можно превысить расходы на проект, если сразу нет понимания, что и для кого именно вы создаёте. Избежать этого и сэкономить финансы позволит прототипирование. Это прекрасный способ апробирования концепции приложения до её реализации. Как известно, прототип – это предварительно созданный макет дизайна, дающий пользователям представление о продукте и возможность взаимодействовать с ним (пока разработка еще не завершена окончательно). Во всём процессе дизайн-мышления прототипирование является четвертым по счету этапом, когда происходит тестирование юзабилити [1,2].

Создание прототипов ПО делает требования более реальными, приближает варианты использования к «жизни» и закрывает пробелы в вашем понимании требований. Прототипы предоставляют пользователям экспериментальную модель или первоначальный срез новой системы, стимулируя их мышление и катализируя обсуждение требований. Обсуждение прототипов на ранних стадиях процесса разработки помогает заинтересованным в проекте лицам прийти к общему пониманию требований к системе, что уменьшает риск недовольства заказчиков [1,2].

Тестирование прототипа продукта необходимо для того, чтобы в случае возникновения проблем (при взаимодействии пользователей и всех заинтересованных сторон с этим продуктом) можно было исправить ошибки и недостатки, и тогда усилия, вложенные в разработку математической модели и дизайна, не будут потрачены зря.

При проектировании веб-сайтов, интерфейсов приложений и иных IT-разработок огромное значение имеет именно пользовательский опыт взаимодействия с продуктом (UserExperience, UX). Тут очень важно, чтобы навигация, формат страниц, подача контента были максимально удобны. Прототип интерфейса позволяет оценить, насколько эффективным получается дизайн [1,2].

Имитационное и симуляционное моделирование работы турбонасосного агрегата (ТНА) в большой доле основывается на результатах эмпирических данных различных авторов [3]. Актуально применение моделирования на раннем этапе разработки ЖРД, так как это позволит снизить вероятность принятия ошибочного решения.

На данный момент имитационное и симуляционное моделирование в ракетно-космической отрасли представляет большой интерес в связи с возможностью решать задачи, сопряженные с проектированием и анализом работы, при этом сводя к минимуму затраты, связанные с проведением испытаний и экспериментов.

Актуальность имитационного моделирования растет благодаря большим возможностям, предоставляемыми пользователю современными средствами вычислительной техники, позволяя реализацию гибких и адекватных реальным процессам алгоритмов на основе математических моделей. Так же актуально применение имитационного моделирования не только на раннем этапе моделирования, но и на этапе предварительных испытаний двигательной установки, так как это позволит снизить вероятность принятия ошибочного решения [3].

Экспериментальным стендам ТНА предъявляются следующие основные требования к [4]: условия и режимы работы двигателя должны быть максимально приближены к натурным условиям эксплуатации; программа испытаний должна предусматривать режимы, учитывающие не только номинальные, но и предельные уровни и градиенты изменения внешних и внутренних влияющих на работоспособность факторов, а также наиболее неблагоприятные их сочетания; в процессе испытаний должно производиться варьирование температуры компонентов топлива и конструкции, входных давлений, некоторых внутренних факторов, программных переключателей регулирующих элементов и рулевых приводов камер сгорания, включая допустимые отклонения в химическом и массовом составе компонентов топлива; система измерения должна обеспечивать контроль и запись всех основных параметров и уровней значимых факторов с необходимой точностью; программа не должна допускать проведения очередного испытания без дешифровки и анализа результатов предыдущих экспериментов; объем испытаний должен быть достаточным для однозначной оценки результатов испытаний и подтверждения заданного уровня надежности [4].

Действительный экспериментальный стенд состоит из следующих элементов: термометры; центробежный насос; трубопроводы; емкость расходная; вентили запорные; вентили регулирующие; манометры; датчики давления; датчики расхода; обратный клапан; предохранительный клапан; фильтры; гидродинамическое радиальное уплотнение; датчик частоты вращения; вакуумный насос и другие элементы.

Основные данные для математической симуляционной модели являются: размеры рабочих колес насоса и турбины; характеристики приборов измерения; теплофизические свойства перекачиваемой жидкости насоса и газа турбины: температура рабочей жидкости на входе; давление воздуха барометрическое и температура газа на входе в турбину; давление на входе в центробежный насос; угловая скорость ротора ТНА и объемный расход рабочей жидкости в центробежном насосе (в качестве режимных параметров).

Для построения и анализа характеристик ТНА рассчитываются и выводятся следующие параметры: частота датчика оборотов, частота турбинного датчика расхода, давление на выходе из насоса, температура рабочей жидкости, давление газа на входе в турбину.

Существует несколько технологий прототипирования, каждая из которых имеет свои преимущества и области применения. Прототип экспериментального стенда ТНА разработан на цифровой технологии `html/css/javascript` и представлен в работе [5].

Таким образом, процессы виртуального прототипирования и имитационного моделирования не требуют каких-либо реальных условий и весомых затрат на их создание, поэтому они очень экономичны, что делает виртуальное прототипирование актуальной, набирающей все больший вес задачей, занимающей важное место в жизненном цикле производства на этапе конструкторского проектирования.

Разработанная симуляционная модель стенда ТНА позволяет анализировать и проводить исследования модели, разработанной в конструкторском программном обеспечении. Расчетный модуль может быть использоваться в программном обеспечении по имитации и симуляции работы жидкостного ракетного двигателя, которое должно значительно сократить время, затрачиваемое на проектирование, анализ работы модели ЖРД, соответствующего заданным техническим требованиям.

### Библиографические ссылки

1. Вигерс Карл И. Разработка требований к программному обеспечению. Пер. с англ. под общ. ред. Ю.П. Леоновой. Microsoft Press; М.: Русская Редакция, 2004. 576 с.:
2. Мардан Азат. Быстрое Прототипирование с JS. Гибкая Разработка на JavaScript. // Интернет издание, 2014. 236 с.
3. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 376 с..
4. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб.пособие В. Г. Яцуненко, В. П. Назаров, А. И. Коломенцев ; Сиб. гос.аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с
5. Характеристики турбонасосного агрегата [Электронный ресурс]. URL: <https://zhukov-dimitri-sibsau-ru.on.driv.tw/HTMLs/tna/> (Дата обращения 2023-09-01).

### References

1. Vigers Karl I. *Razrabotka trebovaniy k programnomu obespecheniyu* [Software Requirements] Microsoft Press; М.: Russkaya Redaktsiya, 2004. 576 p.
2. Mardan Azat. *Bystroe Prototipirovanie s JS. Gibkaya Razrabotka na JavaScript*. [Rapid Prototyping with JS. Flexible JavaScript Development.] Internet izdanie, 2014. 236 p.
3. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Theory and calculation of power units for liquid rocket engines]. 3-e izd., pererab. i dop. М.: Mashinostroenie, 1986. 376 s..
4. *Stendovye ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Bench tests of liquid rocket engines]: ucheb.pособie V. G. Yatsunenکو, V. P. Nazarov, A. I. Kolomentsev ; Sib. gos.aerokosmich. un-t ; Mosk. aviats. in-t. Krasnoyarsk, 2016. 248 s
5. *Kharakteristiki turbonasosnogo agregata* [Characteristics of the turbopump unit][Elektronnyy resurs]. (In Russ.). Available at: <https://zhukov-dimitri-sibsau-ru.on.driv.tw/HTMLs/tna/> (Data obrashcheniya 2023-09-01).

© Жуйков Д. А., 2023

УДК 629

## К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАМЕРОВ ПОЛУЧАЕМОЙ ТРАЕКТОРИИ ТРУБ НА ТРУБОГИБОЧНОМ АГРЕГАТЕ

В. Ю. Журавлев<sup>1\*</sup>, С. В. Титенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: VZ@sibsau.ru

<sup>2</sup> АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: Titenkov-sv@mail.ru

*В тезисах рассматриваются технические вопросы обеспечения точности получаемых размеров траектории труб после их изгиба на агрегате гибки с помощью датчиков, для их последующего использования в изделиях аэрокосмической отрасли.*

*Ключевые слова: расположение датчиков на трубогибочном станке, вид системы управления.*

## ON THE ISSUE OF ENSURING THE ACCURACY OF THE DIMENSIONS OF THE RESULTING PIPE TRAJECTORY ON A PIPE BENDING MACHINE

V. Yu. Zhuravlev<sup>1\*</sup>, S. V. Titenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: VZ@sibsau.ru

<sup>2</sup> JSC "Krasnoyarsk machine-building plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: Titenkov-sv@mail.ru

*The abstracts discuss the technical issues of ensuring the accuracy of the obtained dimensions of the pipe trajectory after their bending on the bending unit.*

*Keywords: the location of the sensors on the pipe-bending machine, view of the control system.*

Базовые составные части трубогибочного агрегата: контроллер – где записан алгоритм работы агрегата; сервоприводы – для реализации лёгких мобильных функций агрегата; моторы – для выполнения тяжёлых функций подачи и гибки трубы; сенсорные датчики – измеряющие скорость подачи трубы и получаемые размеры для информирования и корректной работы контроллера в соответствии с ISO 6983-2009 и ОСТ 92-1601-84 должны обеспечивать требуемое получение размеров на выходе трубы из трубогибочного агрегата с сохранением герметичности и прочности стенок труб после их деформации. Исключить криволинейные выражения траектории при изгибе трубы можно добиться за счёт регламентирования работы агрегата от информации, получаемой от сенсорных датчиков скорости и расстояния [1]. Алгоритм контроллера должен учитывать материал сгибаемого трубопровода и от полученной информации от сенсорных датчиков, должен настраивать требуемую скорость гибки трубы для исключения разрыва стенок [2-3]. Ключевым фактором, обеспечивающим надёжную и в достаточном объёме передаваемую информацию, становится выбор вида системы управления автоматикой агрегата.

В ходе анализа и последующего проектирования агрегата гибки труб, было выявлено, что целесообразно использовать гибридную аналогово-цифровую систему управления автоматикой в шкафу управления составными частями и датчиками агрегата. Так как выявлены преимущества гибридной схемы управления над импульсной по следующим признакам:

1. По точности отражения информации сигналов:

- для импульсных устройств: отсутствует квантование по уровню, что обеспечивает меньшую ошибку по сравнению с цифровыми сигналами;
- для аналоговых устройств: максимальная точность обеспечивается за счёт непрерывного характера информационных процессов;
- для цифровых устройств: аналоговые сигналы дискретизированы по времени и квантованы по уровню, поэтому информация отображается в виде шумов квантования и ограничивается максимальной разрядностью обрабатываемых цифровой системой;

2. По точности выполняемой функции:

- для импульсных устройств: высокая точность обеспечивается благодаря высокой стабильности периода колебаний;
- для аналоговых устройств: ограниченная точность из-за влияния дестабилизирующих факторов в виде температуры, давления, внешних полей на режимы работы устройства;
- высокая точность обеспечивается благодаря двухуровневому кодированию;

3. По помехоустойчивости:

- у импульсных устройств: обеспечивается высокая помехоустойчивость, так как сокращается время, в течение которого помеха может влиять на передаваемый сигнал;
- у аналоговых устройств: низкая помехоустойчивость обусловлена непрерывным характером аналоговых сигналов и шумов;
- у цифровых устройств: высокая помехоустойчивость обусловлена достаточно высоким перепадом уровней между логическими нулём и единицей;

4. По унификации:

- для импульсных устройств: средняя степень унификации (промежуточное положение между аналоговыми и цифровыми устройствами);
- для аналоговых устройств: низкая степень унификации из-за возможности использования разнообразных узлов в виде усилителей, преобразователей частоты и т. п., то есть один и тот же функциональный узел может иметь множество схемных решений;
- для цифровых устройств: высокая степень унификации, так как для построения цифровых устройств служит ограниченный набор функциональных узлов – логических элементов. Принципиально любое цифровое устройство может быть реализовано на одном элементе, например, на логическом элементе «И-НЕ»;

5. По применению микросхем для построения устройств:

- для импульсных устройств: для построения используются цифровые интегральные схемы малой и средней степени интеграции, при этом требуется значительно меньшее количество навесных элементов;
- для аналоговых устройств: используются аналоговые микросхемы (полупроводниковые) представляющие собой завершённые заготовки функциональных узлов. Однако, чтобы придать устройству законченную форму необходимо использовать большое количество навесных элементов (конденсаторов, резисторов, фильтров и др.);
- для цифровых устройств: используются цифровые интегральные схемы всех категорий: малые, средние, большие и сверхбольшие. При этом требуется минимальное количество навесных элементов. В большинстве случаев данная схема представляет собой завершённый функциональный узел и имеет менее жёсткие допуски на параметры, что позволяет обходиться без точных регулировок. Число контролируемых параметров ограничено;

6. По хранению результатов обработки информации:

- у импульсных устройств: требуется создание отдельного устройства для хранения информации сигналов (обычно накопители на магнитной ленте);
- у аналоговых устройств: требуется создание отдельного устройства для хранения информации сигналов (обычно накопители на магнитной ленте);
- у цифровых устройств: имеется широкий и разнообразный комплекс средств для хранения цифровой информации: постоянные статические динамические полупроводниковые запоминающие устройства, накопители на жестких и гибких магнитных дисках, накопители на оптических дисках;

7. По массогабаритным показателям:

- у импульсных устройств: средние габариты;
- у аналоговых устройств: высокие габариты;

- у цифровых устройств: самые низкие габариты;
- 8. По надёжности:
  - у импульсных устройств: средняя надёжность;
  - у аналоговых устройств: средняя надёжность
  - у цифровых устройств: самая высокая надёжность;
- 9. По стоимости:
  - у импульсных устройств: средняя цена;
  - у аналоговых устройств: высокая стоимость;
  - у цифровых устройств: низкая стоимость.

#### Библиографические ссылки

1. Создание возможностей для компьютерного моделирования физических процессов и инженерного анализа // «CAD/CAM/CAE observer», 1(53)/2010. [Электронный ресурс] URL: [http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP\\_Part1\\_n53\\_n44.pdf](http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP_Part1_n53_n44.pdf) (дата обращения: 29.07.2023).
2. Титенков С.В., Журавлев В.Ю. Оптимальная конструкция агрегата гибки труб, применяемых в аэрокосмической отрасли // Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч. конф.: в 2ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Ч. 1, с.266-268.
3. Титенков С.В., Журавлев В.Ю. Использование узкоспециализируемых узлов в агрегате гибки тонкостенных труб // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч. конф.: в 2ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. Ч. 1, с.316-317.

#### References

1. Creating opportunities for computer modeling of physical processes and engineering analysis. Available at: [http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP\\_Part1\\_n53\\_n44.pdf](http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP_Part1_n53_n44.pdf) (accessed: 29.07.2023).
2. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Optimalnaya konstrukciya agregata gibki trub, primenyaemih v aerokosmicheskoy otrasli [Optimal design of the tube bending line used in aerospace industry]. Reshetnevsky readings: materials of the XXV Intern. scientific. cohf.: 2 parts ; under the general editorship of Y. Y. Loginov; Sib. state univ., Krasnoyarsk, 2021, Part 1, p. 266-268.
3. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Ispolzovanie uzkospecializiruemih uzlov v agregate gibki tonkostennih trub [The use of highly specialized units in the thin-walled pipe bending unit]. Reshetnevsky readings: materials of the XXVI Intern. scientific. cohf.: 2 parts ; under the general editorship of Y. Y. Loginov; Sib. state univ., Krasnoyarsk, 2022, Part 1, p. 316-317.

© Журавлев В. Ю., Титенков С. В., 2023

УДК 621.452.3

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРОЩЕНИЯ ВЫХОДНОЙ КРОМКИ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ МЕЖЛОПАТОЧНОГО КАНАЛА

В. М. Зубанов\*, С. А. Мельников, А. А. Харитонов, Лю Син

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

\*E-mail: waskes91@gmail.com

*В работе выполнена оценка влияния способа задания выдува охлаждающего воздуха из выходной кромки соплового аппарата на пропускную способность межлопаточного канала. При использовании упрощенной модели пропускная способность межлопаточного канала СА увеличилась на 0,2–0,3%.*

*Ключевые слова: ГТД, турбина, охлаждаемая лопатка, пропускная способность, коррекция.*

## ASSESSMENT OF THE TRAILING EDGE SIMPLIFICATION INFLUENCE OF THE NOZZLE VANES ON ON TURBINE BLADE FLOWING CAPACITY

V. M. Zubanov\*, S.A. Melnikov, A.A. Kharitonova, Liu Xin

Samara National Research University named after S.P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: waskes91@gmail.com

*In this work, the influence of the method of setting the cooling air blowout from the outlet edge of the nozzle apparatus on the throughput of the interblade channel was evaluated. Using a simplified model, the throughput of the CA interblade channel increased by 0.2-0.3%.*

*Keywords: GTE, turbine, cooled blade, throughput, correction.*

Повышение эффективности и надежности узлов газотурбинного двигателя (ГТД) является одним из основных направлений современного авиационного двигателестроения. Лопатки турбин современных ГТД из-за высоких параметров цикла и, соответственно, температуры газа на выходе из камеры сгорания выполняются охлаждаемыми [1].

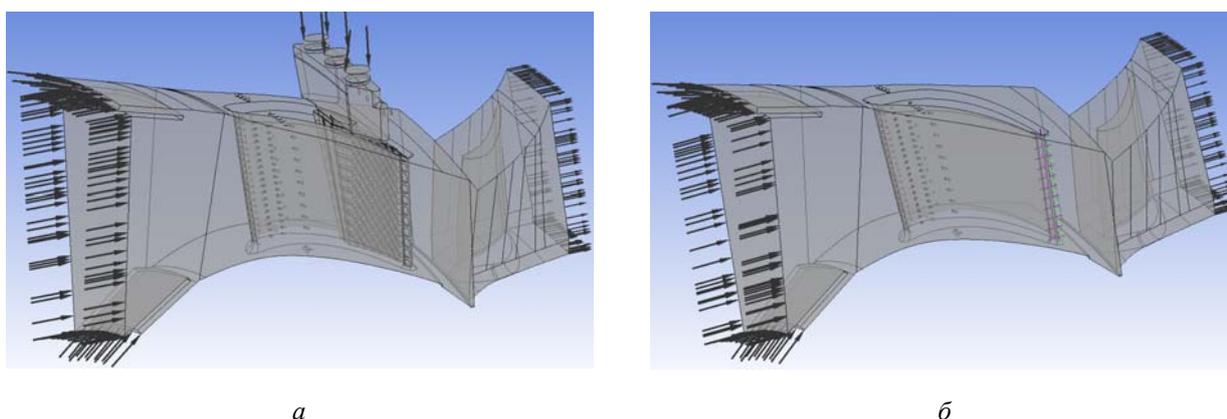
Традиционные методики проектирования и газодинамического моделирования лопаток турбин предполагают использование идеально гладких поверхностей лопаток и трактовых полок. Использование аэродинамических поверхностей лопаток не учитывает наличие отверстий на выходной кромке для выхода охлаждающего воздуха из системы охлаждения лопатки в основной поток газа.

Обозначенный выше фактор требует дополнительного исследования, поскольку может создать риск при проектировании ГТД. В связи с этим была поставлена задача оценить влияние способа задания выдува охлаждающего воздуха из выходной кромки (упрощения выходной кромки) на пропускную способность межлопаточного канала соплового аппарата.

Объектом исследования является рабочий процесс ступени турбины с охлаждаемыми лопатками. В качестве предмета исследования выбраны ступени ТВД и ТСД. Лопатка СА ТСД имеет конвективное охлаждение. Лопатка СА ТВД имеет конвективно-плёночное охлаждение, но в рассмотренной задаче плёночное охлаждение не рассматривалось.

Оценка влияния упрощения выходной кромки на пропускную способность исследуемой турбины была выполнена в программном комплексе ANSYS CFX 2021 [2]. Для каждой из ступеней были созданы расчётные модели (рис. 1 и 2):

- упрощенная модель – выдув охлаждающего воздуха моделируется с ячеек сеточной модели поверхности лопатки;
- модель с прямым моделированием области выдува из выходной кромки.



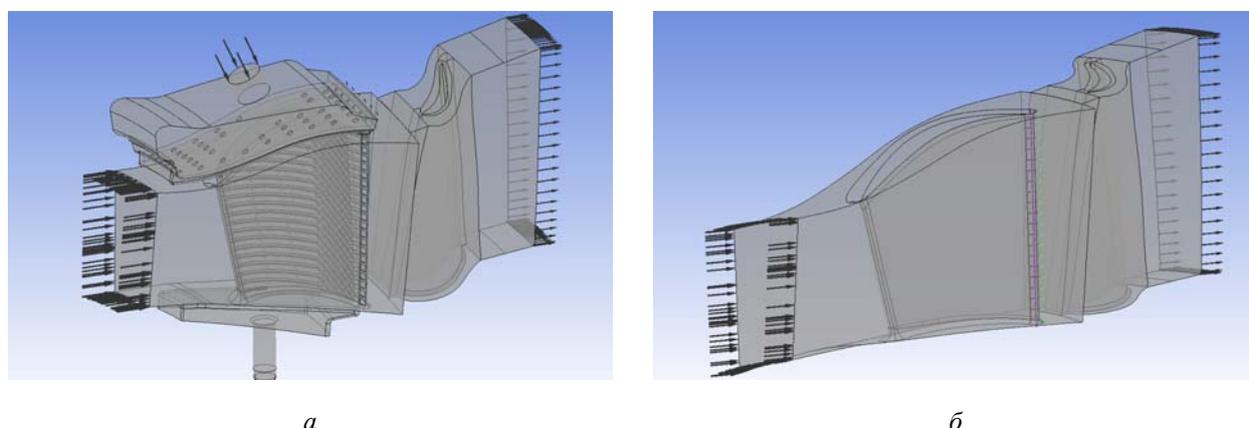
*a*

*б*

Рис. 1. Модель СА ТВД:

*a* – с прямым моделированием выдува из выходной кромки;

*б* – упрощенная модель с выдувом охлаждающего воздуха с ячеек сеточной модели поверхности лопатки



*a*

*б*

Рис. 2. Модель СА ТСД:

*a* – с прямым моделированием выдува из выходной кромки; *б* – упрощенная модель с выдувом охлаждающего воздуха с ячеек сеточной модели поверхности лопатки

Моделирование выполнено с использованием одинаковых граничных условий для модели с прямым моделированием области выдува из выходной кромки и упрощенной модели. Граничные условия для основного потока были получены из результатов численного моделирования сквозной модели турбин. Расчет выполнен в адиабатной постановке, чтобы исключить влияние нагрева охладителя и снижения температуры металла в результате сопряженного аэродинамического и теплового расчета. То есть в рассмотренном случае охлаждающий воздух имеет практически одинаковые температуры (за исключением незначительного подогрева от вязкостного трения в случае прямого моделирования) в области выдува с выходной кромки.

При использовании упрощенной модели количество отверстий было подобрано таким образом, чтобы повторить площадь окошек из полной геометрии. При этом скорость выдува охлаждающего воздуха с поверхностей ячеек стала сравнялась с уровнем скорости охлаждающего воздуха, определенным в результате расчета геометрии с прямым моделированием выходной кромки СА.

По результатам выполненных расчетов получены следующие значения корректировок пропускных способностей СА ТВД и СА ТСД, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Значение поправок пропускной способности СА  
(относительно моделей с прямым моделирование выдува из выходной кромки)**

Лопаточный венец	<b>84, %</b>
СА ТВД	-0,28
СА ТСД	-0,20

Таким образом, в результате выполненной работы было выявлено несущественное увеличение пропускной способности межлопаточного канала СА на 0,2–0,3% при использовании упрощенной модели.

#### Библиографические ссылки

1. А. В. Викулин, В. А. Земляная, Е. Н. Жильцова. Разработка системы охлаждения и верификация результатов моделирования температурного состояния рабочей лопатки газовой турбины // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6(86). С. 114-121.
2. Ansys Workbench Product Release Notes. ANSYS, Inc. and ANSYS Europe, Ltd. are UL registered ISO 9001:2000 Companies.

#### References

1. A. V. Vikulin, V. A. Zemlyanaya, Ye. N. Jiltsova. *Razrabotka sistemi ohlagdeniya i verifikaciya rezultatov modelirovaniya temperaturnogo sostoyaniya rabpchey lopatki gazovoy turbini* [Development of the cooling system and verification of the results of modeling of the temperature state of the gas turbine working blade] // *Izvestiya Samarskogo nauchogo centra Rossiyskoy akademii nauk* [Journal of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 2018. Vol. 20, № 6(86). p. 114-121.
2. Ansys Workbench Product Release Notes. ANSYS, Inc. and ANSYS Europe, Ltd. are UL registered ISO 9001:2000 Companies.

© Зубанов В. М., Мельников С. А., Харитонов А. А., Лю Син, 2023

УДК 004.94

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОЛОСТЯХ КАМЕРЫ РДМТ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г. А. Кирюшкин\*, В. П. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: kiruhkingrisha@mail.ru

*Представлены результаты численного моделирования градиентов температур на поверхности огневой стенки камеры двигателя и рабочей среды в тракте охлаждения в программе Solidworks Flow Simulation.*

*Ключевые слова: РДМТ, SLM-печать, численное моделирование.*

## DETERMINATION OF THE TEMPERATURE GRADIENT IN THE LTRE CHAMBER CAVITIES BY NUMERICAL SIMULATION

G. A. Kiryushkin\*, V. P. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: kiruhkingrisha@mail.ru

*The results of numerical simulation of temperature gradients on the surface of the firing wall of the engine chamber and the working medium in the cooling path in the Solidworks Flow Simulation program are presented.*

*Keywords: LTRE, SLM-printing, numerical simulation.*

Один из важнейших факторов, который следуют учитывать при проектировании ракетных двигателей, является охлаждение камеры двигателя. Необходимо проводить точные расчеты охлаждения, поскольку в процессе работы двигателя происходит интенсивный нагрев, который может привести к прогару наиболее термически нагруженных участков камеры [1-2].

Применение численного моделирования позволяет существенно уменьшить время и затраты на ресурсы, для этого была создана модель камеры ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) в программе Solidworks Flow Simulation.

Камера двигателя (поз. 1), изготовленная аддитивными технологиями (методом SLM-печати) из жаропрочного никель-хромового сплава инконель 718, представляет собой оболочку вращения и состоит из огневой стенки (поз.2) и рубашки (поз. 3), связанных между собой оребрением (поз. 4), Геометрические параметры определены на основе термодинамического расчета и расчета охлаждения (рис. 1). Коллекторы располагаются на рубашке следующим образом: входной (поз. 5) – в области критического сечения, выходной (поз. 6) – в области цилиндрической части камеры. Подводы для поступления жидкости в тракт охлаждения находятся в стадии разработки из-за особенностей 3Д-печати, в данной работе они представляют собой цилиндрические бобышки диаметром 10 мм с отверстием 7 мм.

Целью данной работы было получение картин распределения температуры рабочей среды в тракте охлаждения и на поверхности огневой стенки камеры двигателя численным методом.

В пакете Solidworks Flow Simulation был создан проект расчета [3], где были заданы граничные условия: массовый расход на входном коллекторе  $\dot{m}=0,1$  кг/с, статическое давление на выходном коллекторе  $p=0,00085$  МПа, массовый расход продуктов сгорания на входе  $\dot{m}=0,06755$  кг/с, статическое давление на срезе сопла  $p=0,00085$  МПа.

В результате проведенного расчета были получены картины распределения температуры рабочей среды в тракте охлаждения (рис. 2), и на поверхности огневой стенки камеры двигателя (рис.3) [4-5].

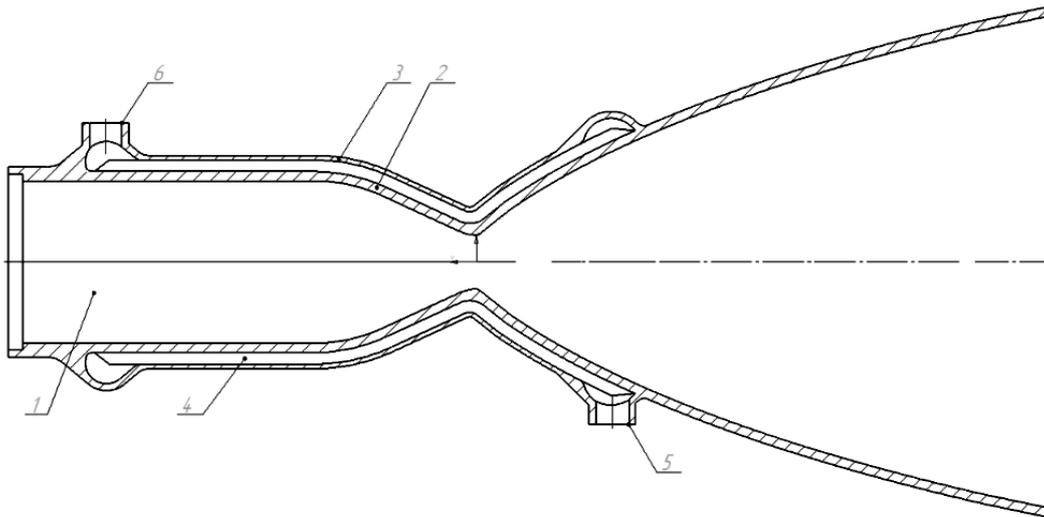


Рис. 1. Камера двигателя

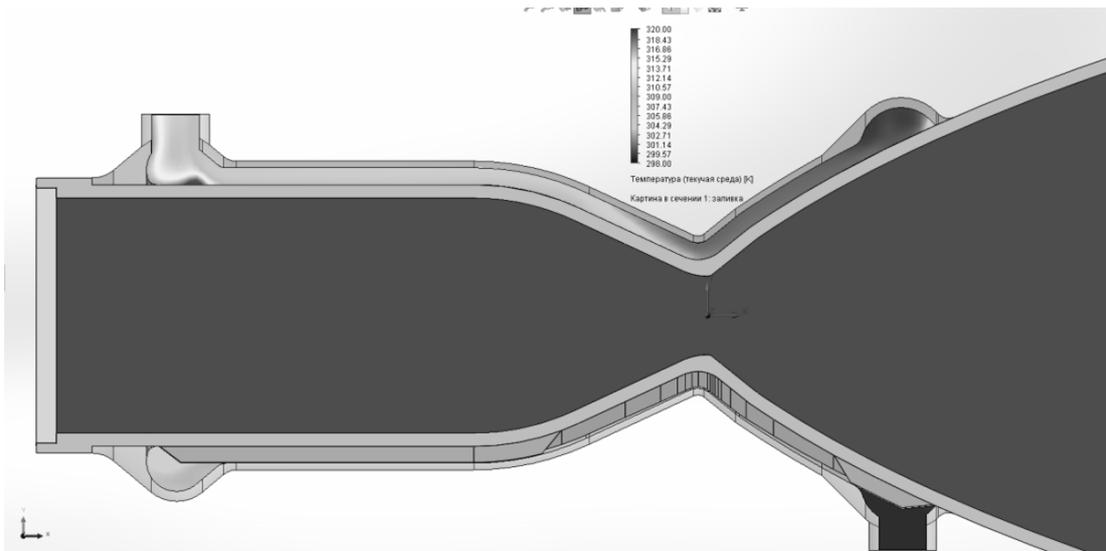


Рис. 2. Картина распределения температуры рабочей среды в тракте охлаждения

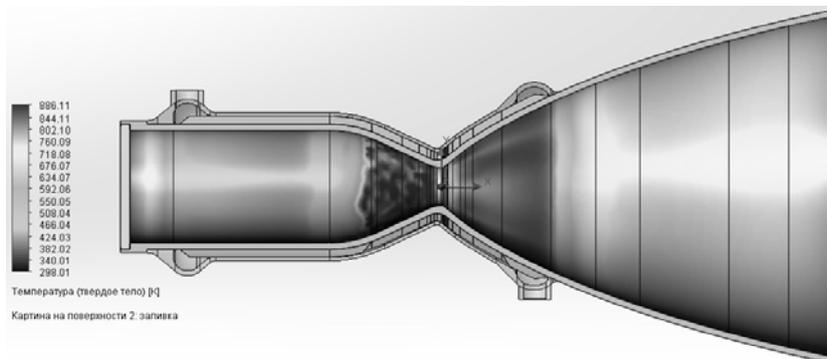


Рис. 3. Картина на поверхности огневой стенки камеры двигателя

## Результаты, выполненные Solidworks Flow Simulation

Средняя температура текучей среды	326 К
Температура цилиндрической части огневой стенки	466,04 К
Температура критической части огневой стенки	886,11 К
Температура на срезе сопла	766,27 К

Следовательно, программный модуль Solidworks Flow Simulation служит хорошим инструментом и может быть использован для численного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в камерах РД.

## Библиографические ссылки

1. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1989. 464 с.
2. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 488 с.
3. Бабкина Л. А., Сорокин Д. В. Моделирование течения жидкости и газа в пакете SolidWorks Flow Simulation. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2012. 72 с.
4. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М. : ДМК Пресс, 2015. 562 с.
5. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

## References

1. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. Teoriya raketnykh dvigateley [Rocket engine theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 464 p.
2. Dobrovolskii M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid propellant rocket engines]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2005, 488 p.
3. Babkina L. A., Sorokin D. V. *Modelirovanie techeniya zhidkosti i gaza v pakete SolidWorks Flow Simulation* [Simulation of liquid and gas flow in the SolidWorks Flow Simulation package]. Krasnoyarsk, Sib. St. Univ. Publ., 2012, 72 p.
4. Alyamovskii A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]. Moscow, DMK Press Publ., 2015, 562 p.
5. Alyamovskii A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. *SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike* [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. St.Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 800 p.

© Кирюшкин Г. А., Назаров В. П., 2023

УДК 629.7.063.6

## УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАЗДЕЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОГО БАКА

Д. А. Климовский, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Klinsky92@yandex.ru

*В работе приводятся результаты моделирования металлической диафрагмы-разделителя топливного бака, нагруженной равномерным давлением с учетом пластических свойств материала в программном комплексе MSC NASTRAN. Получены предварительные зависимости углов уточненной зоны пластической деформаций от угла торовой зоны.*

*Ключевые слова: диафрагма-разделитель, конечно-элементное моделирование, MSC NASTRAN.*

## UPDATED MODEL FOR PLASTIC DEFORMATION ZONE OF METAL FUEL TANK SEPARATOR

D. A. Klimovskiy, V. Yu. Zhuravlev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Klinsky92@yandex.ru

*The paper provides the results of simulation metal eversible diaphragm separator for fuel tank loaded uniform pressure with the plastic properties of the material in the software package MSC NASTRAN. Preliminary dependences for the angles of the refined plastic deformation zone on the angle of the torus zone are presented.*

*Keywords: diaphragm separator, finite element modeling, MSC NASTRAN.*

При проектирования космических аппаратов важным вопросом является обеспечение надежной работы жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в условиях невесомости [1-3]. Запуск ЖРД в условиях невесомости невозможен без гарантированного разделения жидкой и газовой фазы в топливном баке космического аппарата. Одно из решений данной задачи предполагает применение металлических выворачивающихся разделителей [1-3]. Исследование процесса выворачивания диафрагм-разделителей является актуальной задачей.

Математические зависимости параметров выворачивания разделителей, составленные на экспериментально обоснованной физической модели пластического деформирования, не обладают достаточной точностью и соответствием результатами экспериментов. Это можно объяснить принятой без достаточного обоснования физической моделью с симметричными границами зоны пластического деформирования и видом поверхности выворачивания, принимаемой как торовая.

В работе [4] приводится порядок моделирования металлического разделителя топливного бака в пакете MSC NASTRAN [5]. Исходные данные для моделирования:

- Углы торовой зоны  $\varphi = \pm 90^\circ$ , ( $80^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $20^\circ$ ), радиус внутренней сферической части  $R = 200$  мм., толщина оболочки  $s = 2$  мм.
- Материал – алюминиевый сплав АД-1М ( $E = 0,7 \times 10^5$  МПа,  $\mu = 0,27$ ,  $\sigma_{02} = 50$  МПа,  $\sigma_B = 80$  МПа,  $\epsilon_B = 0,35$ , изотропный, упруго-пластичный);
- Граничные условия – защемленный край внешнего среза оболочки.

Результат моделирования в первом приближении для угла  $\varphi = \pm 80^\circ$  приведены на рисунке 1 слева. Результаты для других углов носят аналогичный характер. Для наглядности отображаются только напряжения, превышающие предел текучести. Анализ напряжений показывает, что область пласти-

ческих деформаций не доходит до границы торовой зоны на внешнем краю разделителя (точка Н□) и превышает её на внутренней границе (точка В□) (см. рис. 1 справа).

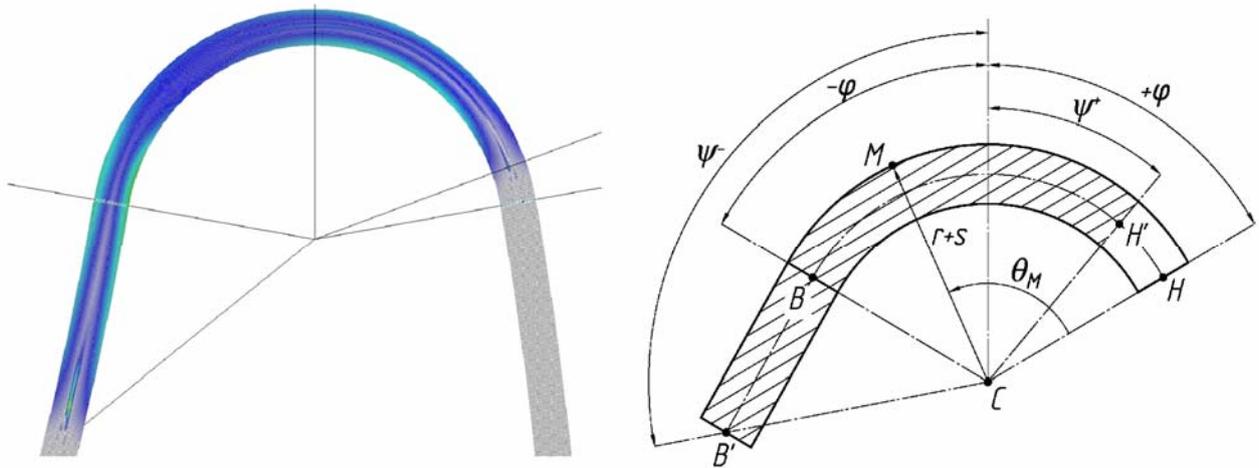


Рис. 1. Распределение пластических напряжений в около торовой зоне.

Для учета полученных результатов предлагается ввести новые уточненные углы зоны пластических деформаций  $\psi^+$  со стороны точки Н' и  $\psi^-$  со стороны точки В' (см. рис. 1 справа). Зависимости введённых углов от угла торовой зоны  $\varphi$ , полученные по результатам численного моделирования, представлены на рис. 2.

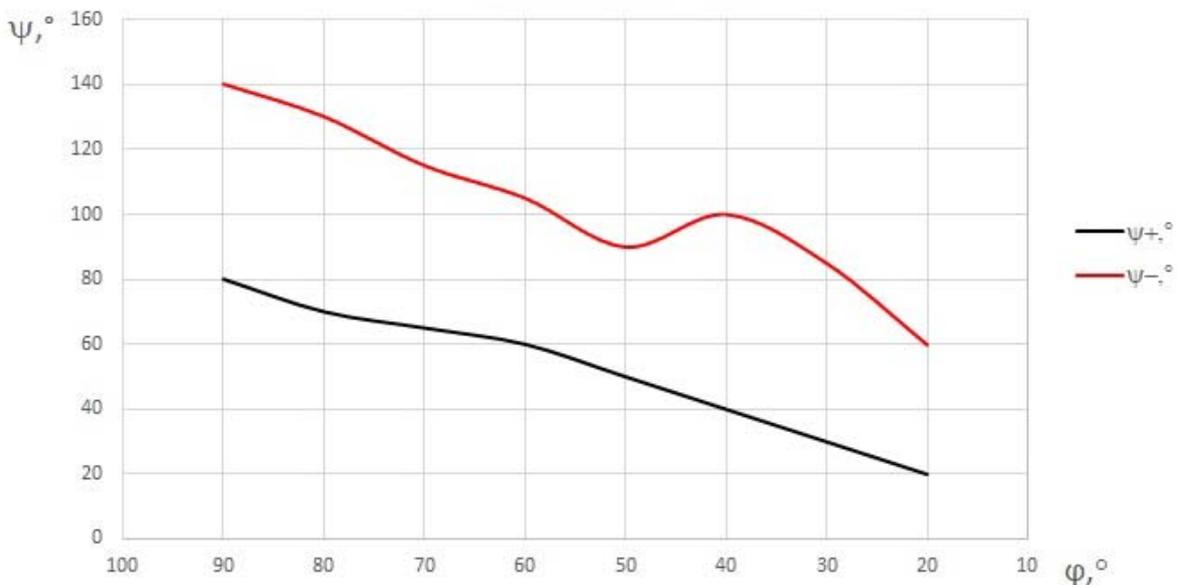


Рис. 2. Зависимость уточненных углов зоны пластических деформаций от угла торовой зоны

Уточненные углы должны использоваться при решении основного уравнения энергетического принципа (1) [2,3].

$$\int_F X_n V_n dF = \tau_s \int_V H' dV. \quad (1)$$

Для этого при решении интеграла в правой части объем зоны пластических деформаций нужно брать не на угле  $2\varphi$ , а на угле  $(\psi^- + \psi^+)$ .

### Библиографические ссылки

1. Технология сборки и испытаний космических аппаратов: Учебник для высших технических учебных заведений / И.Т. Беляков, И.А. Зернов, Е.Г. Антонов и др.; под общ. ред. И. Т. Белякова и И. А. Зернова. М.:Машиностроение, 1990.-352 с.
2. Ефремов В. Н. Разделители топливных баков с отрицательной деформацией параллели: моногр. / В. Н. Ефремов, В. Ю. Журавлев, О. П. Якубович; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 76 с.
3. Кубриков М. В., Журавлев В. Ю. Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков / М.В. Кубриков, В.Ю. Журавлев // Вестник СибГАУ. Вып. 4(30). Красноярск, 2010. С.105-107.
4. Климовский Д.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния упруго-пластичного разделителя топливного бака / Авиакосмические технологии (АКТ-2020). Труды XXI Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. II Тур. Воронеж, 2020. с. 272-278.
5. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде FEMAP with NX NASTRAN. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

### References

1. *Tehnologija sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft assembly and testing technology]: Uchebnik dlja vysshih tehnicheskikh uchebnyh zavedenij / I.T. Beljakov, I.A. Zernov, E.G. Antonov i dr.; pod obshh. red. I. T. Beljakova i I. A. Zernova. M.:Mashinostroenie, 1990.-352 s.
2. Efremov V. N. *Razdeliteli toplivnyh bakov s otricatel'noj deformaciej paralleli* [Parallel deformation fuel tank dividers]: monogr. / V. N. Efremov, V. Ju. Zhuravlev, O. P. Jakubovich; Sib. gos. ajerokosmich. un-t. Krasnojarsk, 2005. 76 s.
3. Kubrikov M. V., Zhuravlev V. Ju. *Proektirovanie diafragm-razdelitelej udlinennyh toplivnyh bakov* [Design of diaphragm-separators for elongated fuel tanks] / M.V. Kubrikov, V.Ju. Zhuravlev // Vestnik SibGAU. Vyp. 4(30). Krasnojarsk, 2010. S.105-107.
4. Klimovskiy D.A. *Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uprugoplastichnogo razdelitelya toplivnogo baka* [Stress-deformed state simulation for elastic-plastic fuel tank separator] / Aviakosmicheskiye tekhnologii (AKT-2020). Trudy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. II Tur. Voronezh, 2020. s. 272-278.
5. Rychkov S.P. *Modelirovaniye konstruktsiy v srede FEMAP with NX NASTRAN* [Finite-element modeling of a thin-walled shell in zones of large curvature in the MSC NASTRAN software package]. M.: DMK Press, 2013. 784 s.

© Климовский Д. А., Журавлев В. Ю. 2023

УДК 621.42.02

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ИХ ПАРАМЕТРЫ

И. А. Кудряшов\*, Е. С. Горячкин, С. А. Мельников, А. А. Харитоновна, Е. Д. Гатауллина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: ivan.kudryash1337@gmail.com

*Работа посвящена исследованию влияния учета термомеханического деформирования проточной части компрессора на его параметры.*

*Ключевые слова: осевой компрессор, характеристики, деформации, лопаточные машины.*

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF DEFORMATION FLOW PATH OF AXIAL COMPRESSOR ON IT PERFORMANCE PARAMETERS

I. A. Kudryashov\*, E. S. Goryachkin, S. A. Melnikov, A. A. Kharitonova, E. D. Gataullina

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: ivan.kudryash1337@gmail.com

*The work is devoted to the study of the effect of taking into consideration the thermomechanical deformation of the flow path on the parameters of axial compressor.*

*Keywords: axial compressor, characteristics, turbomachinery.*

Газотурбинный двигатель (ГТД) является многорежимной машиной. В процессе работы узлы двигателя деформируются из-за различных факторов: тепловых, центробежных нагрузок и др. Это приводит к изменению их геометрии и параметров работы, что, в свою очередь, приводит к изменению параметров всего двигателя. Поэтому для корректной оценки параметров работы двигателя на различных режимах, должно учитываться изменение геометрии его узлов.

Одним из основных узлов ГТД компрессор, эффективность которого в значительной степени определяет эффективность всего двигателя [1].

Запасы газодинамической устойчивости (ГДУ) компрессора ГТД определяют диапазон возможной работы всего двигателя, вследствие этого при расчете его характеристик необходимо учитывать деформации проточной части, которые возникают в процесс работы.

Целью работы является оценка влияния деформаций элементов проточной части компрессора, вычисленных по результатам термомеханического расчета, на характеристики и основные параметры.

Создание численной модели выполнено в программном комплексе Numesa FineTurbo с использованием встроенного сеткопостроителя Numesa AutoGrid.

Геометрия исходной расчетной области построена на основе конструкторской документации, а геометрия «горячей» (деформированной) проточной части получена по результатам выполнения термомеханического расчета всего двигателя. Расчетная область состоит из следующих доменов: домен стойки опоры, домен входного направляющего аппарата, доменов рабочих колес (РК) и доменов направляющих аппаратов (НА) (рис. 1).

Суммарное количество элементов в сеточной модели составляет 36,8 млн. Среднее количество элементов для одного домена РК составляет 1,2 млн., а для одного домена НА – 0,9 млн. Величина минимальной скошенности 22,9 градусов. Среднее значение коэффициента удлинения элемента (Aspect Ratio (AR)) составляет 1000.

При настройках расчетной модели в программном комплексе Numesa FineTurbo в качестве рабочего тела используется модель реального газа с постоянным значения газовой постоянной R и пере-

менной изобарной теплоемкостью  $c_p = f(T)$  для сухого воздуха [2] и переменной кинематической вязкостью  $\nu_t = f(T)$ .

При расчетах использовалась модель турбулентности k-epsilon (Extended Wall Function).

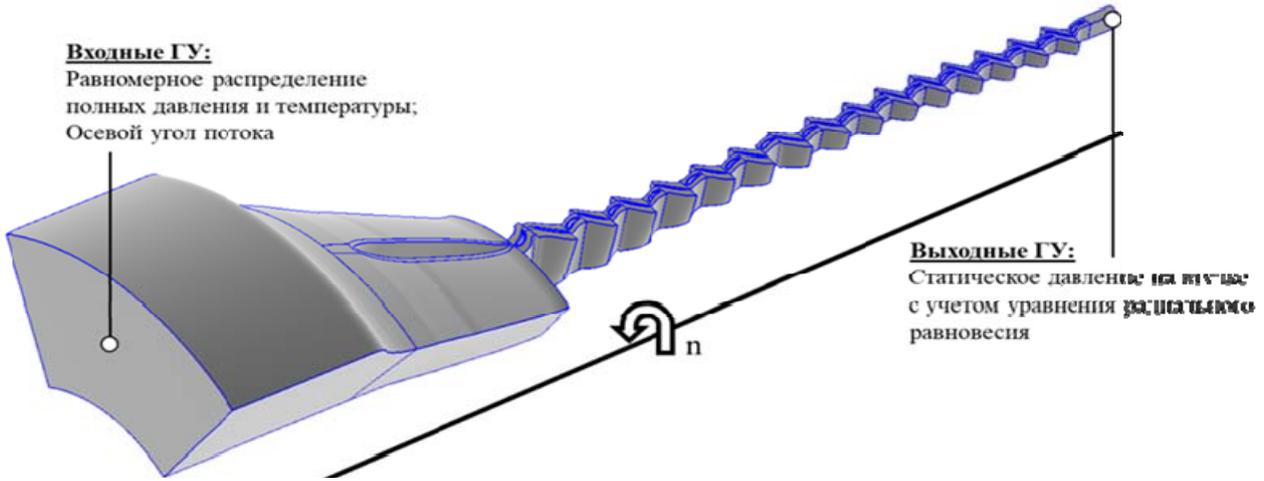


Рис. 1. Геометрия расчетной области исследуемого компрессора

В качестве граничных условий: на входе в численную модель задается равномерное радиальное распределение полного давления  $p_{ex}^* = 101325 \text{ Па}$  и полной температуры  $T_{ex}^* = 288,15 \text{ К}$  и осевое направление потока; на выходе из численной модели задается значение статического давления на втулочном сечении с учетом радиальной неравномерности потока.

В результате выполнен расчет характеристик компрессора без учета и с учетом деформаций двигателя в зависимости от режима. Результаты приведены в виде характеристик  $\eta_k^* = f(G_{ex.np.ex})$  и  $\pi_k^* = f(G_{ex.np.ex})$  (рис. 2).

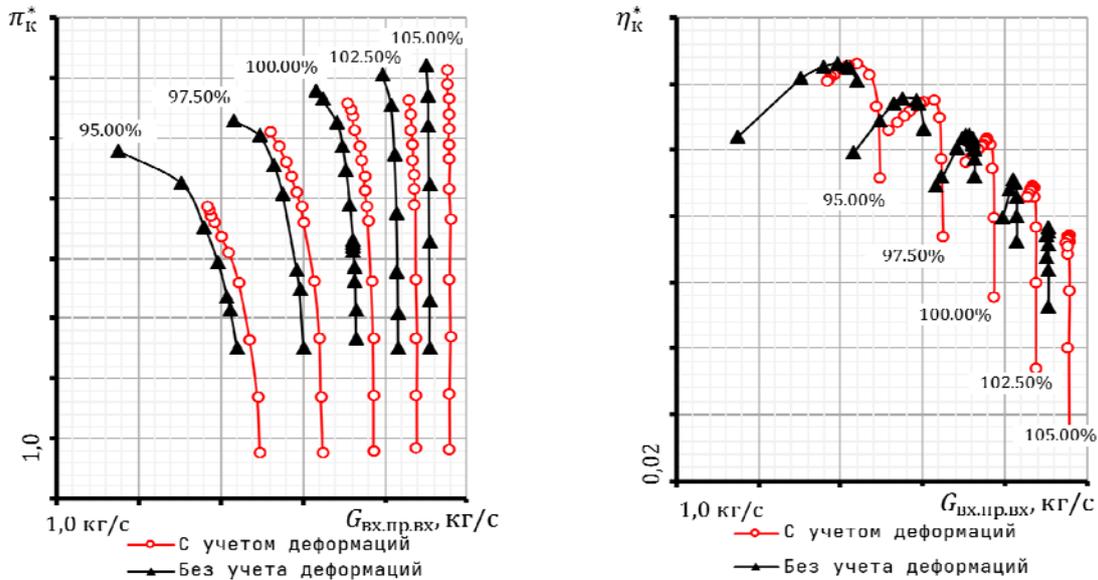


Рис. 2. Рассчитанные характеристики

Из полученных результатов следует, что:

- КПД компрессора снизился на 0,1%
- запасы ГДУ увеличились на 1,0%
- расход воздуха через компрессор увеличился на 0,6%.

В результате выполненного исследования получено, что при расчете характеристик осевого компрессора необходимо учитывать деформации проточной части, в частности изменение радиального зазора, т.к. это приводит к изменению протекания характеристик компрессора, что по итогу приводит к некорректному определению параметров двигателя.

#### **Библиографический список**

1. Кулагин, В. В., Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. 3-е изд. В 2 кн. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термозодинамический анализ. [Текст] / В. В. Кулагин, В. С. Кузьмичев М.: Машиностроение, 2013. 336 с.
2. Дорофеев, В. М., Термозодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 144 с.

#### **References**

1. Kulagin, V. V., Teoriya, raschet i proektirovanie aviacionnih dvigateley i eenergeticheskikh ustanovok: uchebink. 3-e izd. V 2 kn. Kn. 1. Osnovy teorii GTD. Rabochii process i termogazodinamicheskii analiz [Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants: textbook. 3-th ed. In 2 vols. 1. Fundamentals of GTE theory. Operation process and thermo-gas-dynamic analysis], Moscow, Mashinostroenie, 2013, 336 p.
2. Dorofeev, V. M. Termogazodinamicheskij raschet gazoturbinnih silovyh ustanovok [Thermogasodynamic calculation of gas turbine power plants]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 144 p.

© Кудряшов И. А., Горячкин Е. С., Мельников С. А.,  
Харитонов А. А., Гатауллина Е. Д., 2023

УДК 621.42.02

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ НА ЕЕ ПАРАМЕТРЫ\*

И. А. Кудряшов\*, Е. С. Горячкин, Г. М. Попов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: ivan.kudryash1337@gmail.com

*Работа посвящена исследованию влияния учета термомеханического деформирования проточной части турбины на характеристики осевых турбин.*

*Ключевые слова: осевая турбина, характеристики, деформации, лопаточные машины.*

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF DEFORMATION OF AXIAL TURBINE FLOW PATH ON THEIR PERFORMANCE PARAMETERS

I. A. Kudryashov\*, E. S. Goryachkin, G. M. Popov

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: ivan.kudryash1337@gmail.com

*The work is devoted to the study of the effect of taking into consideration the thermomechanical deformation of the flow path on the parameters of axial turbines.*

*Keywords: axial compressor, axial turbine, characteristics, turbomachinery.*

Газотурбинный двигатель (ГТД) является многорежимной машиной, его узлы подвержены деформации из-за тепловых и центробежных нагрузок. Эти деформации приводят к изменению геометрии и параметров работы, что, в свою очередь, приводит к изменению параметров всего двигателя. Для корректной оценки параметров работы двигателя необходимо учитывать изменение геометрии при переходах на различные режимы.

Одним из основных узлов ГТД является турбина, эффективность которой в значительной степени определяет эффективность всего двигателя [1].

Турбина испытывает повышенные температурные и центробежные нагрузки в процессе эксплуатации, и как следствие этого, изменяются геометрические параметры турбины – диаметральные размеры, изменение радиальных зазоров, которые оказывают существенное влияние на эффективность турбины и всего двигателя в целом.

Целью работы является оценка влияния деформаций элементов проточной части турбины, вычисленных по результатам термомеханического расчета, на ее характеристики и основные параметры.

Создание численной модели выполнено в программном комплексе Numesa FineTurbo с использованием встроенного сеткопостроителя Numesa AutoGrid.

Геометрия исходной расчетной области построена на основе конструкторской документации, а геометрия «горячей» (деформированной) проточной части получена по результатам термомеханического расчета всего двигателя. Расчетная область состоит из следующих доменов: доменов стоек опоры, а, доменов рабочих колес (РК) и доменов сопловых аппаратов (СА) (рис. 1).

Суммарное количество элементов в сеточной модели составляет 75,4 млн. Среднее количество элементов для одного домена РК составляет 2,1 млн., а для одного домена СА – 2,3 млн. Величина минимальной скошенности 20,1 градусов. Среднее значение коэффициента удлинения элемента (Aspect Ratio (AR)) составляет 1500.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10266.

При настройках расчетной модели в программном комплексе Numeca FineTurbo в качестве рабочего тела используется модель реального газа с постоянным значения газовой постоянной  $R$  и переменной изобарной теплоемкостью  $c_p = f(T)$  для продуктов сгорания [2] и переменной кинематической вязкостью  $\nu_i = f(T)$ .

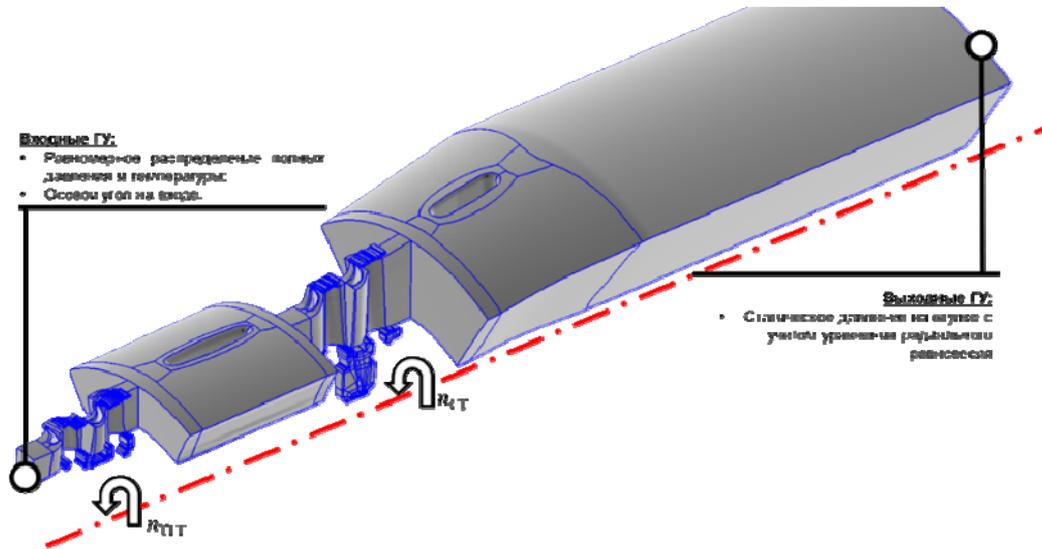


Рис. 1. Геометрия расчетной области исследуемой турбины

При расчетах использовалась модель турбулентности Spallart-Allmaras.

В качестве граничных условий: на входе в численную модель задается равномерное радиальное распределение полного давления, полной температуры, и осевое направление потока; на выходе из численной модели задается значение статического давления на втулочном сечении с учетом радиальной неравномерности потока.

В результате выполнен расчет характеристик турбин без учета и с учетом деформаций двигателя в зависимости от режима. Результаты приведены в виде характеристик ТГГ и СТ  $\eta_m^* = f(\pi_m^*)$  (рис. 2).

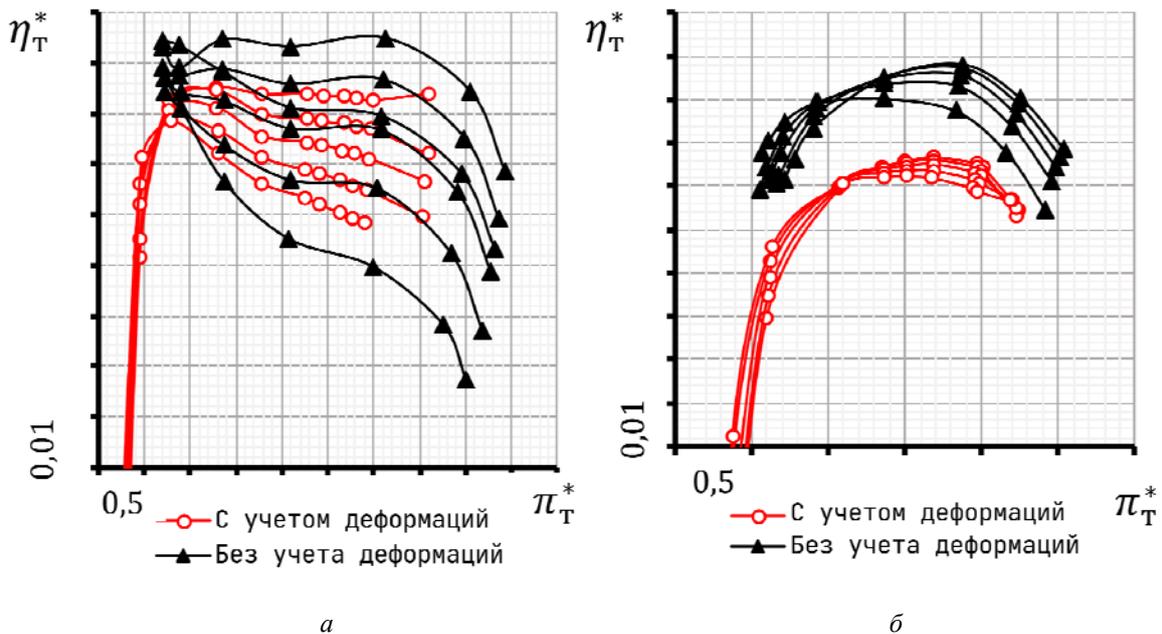


Рис. 2. Рассчитанные характеристики:  
 а – турбина газогенератора; б – свободная турбина

Из полученных результатов следует, что:

- КПД ТГГ снизился на 0,7%;
- Пропускная способность ТГГ увеличилась на 0,62%;
- КПД СТ снизился на 1,1%;
- Пропускная способность СТ увеличилась на 1,70%.

В результате выполненного исследования получено, что при расчете характеристик осевой турбины необходимо учитывать деформации проточной части, т. к. это приводит к существенным изменениям параметров турбин – КПД и пропускной способности. Неучет деформаций приведет к некорректному определению параметров двигателя в целом, т. к. изменятся условия совместной работы узлов двигателя[1].

#### **Библиографический список**

1. Кулагин, В. В., Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. 3-е изд. В 2 кн. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термозодинамический анализ. [Текст] / В. В. Кулагин, В. С. Кузьмичев М.: Машиностроение, 2013. 336 с.
2. Дорофеев, В. М., Термозодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 144 с.

#### **References**

1. Kulagin, V. V., Teoriya, raschet i proektirovanie aviacionnih dvigateley i eenergeticheskikh ustanovok: uchebink. 3-e izd. V 2 kn. Kn. 1. Osnovy teorii GTD. Rabochii process i termogazodinamicheskii analiz [Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants: textbook. 3-th ed. In 2 vols. 1. Fundamentals of GTE theory. Operation process and thermo-gas-dynamic analysis], Moscow, Mashinostroenie, 2013, 336 p.
2. Dorofeev, V. M. Termogazodinamicheskij raschet gazoturbinnih silovyh ustanovok [Thermogasodynamic calculation of gas turbine power plants]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 144 p.

© Кудряшов И. А., Горячкин Е. С., Попов Г. М., 2023

УДК 620.181.5

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Э. С. Манохина\*, М. А. Шикарев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: xim96@inbox.ru

*В данной работе оценивается надёжность камеры ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом SLM-печати из материала Inconel 718. Оценка производится при сравнении эквивалентного напряжения с пределом прочности материала, полученным при проведении механических испытаний.*

*Ключевые слова: SLM-печать, Inconel 718, свойства материала, анализ параметров печати.*

## EVALUATION OF THE RELIABILITY OF LOW-THRUST ROCKET ENGINES BASED ON THE RESULTS OF MECHANICAL TESTS

E. S. Manokhina\*, M. A. Shinkarev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: xim96@inbox.ru

*In this paper, the reliability of the chamber of a low-thrust rocket engine made by SLM printing from Inconel 718 material is evaluated. The assessment is made by comparing the equivalent voltage with the ultimate strength of the material obtained during mechanical tests.*

*Keywords: SLM printing, Inconel 718, material properties, analysis of printing parameters.*

В настоящее время у проектировщиков ракетных двигателей большой интерес вызывает возможность создания элементов с помощью современных аддитивных технологий. Потенциально внедрение аддитивных технологий в процесс производства РД может обеспечить его удешевление, а также уменьшение сроков производства.

Одной из основных задач при рассмотрении вопроса внедрения аддитивных технологий на производстве является обеспечение высокого качества и высокой надёжности производимых изделий.

На всех этапах создания РД оценка надёжности проводится с учётом качества используемых материалов и степени технологического совершенства производства. Подтвердить заявленную надёжность РД возможно только при проведении комплекса испытаний в процессе его производства.

В работе рассматривается камера ракетного двигателя малой тяги (РДМТ), изготовленная методом SLM-печати. Материал камеры – Inconel 718 марки ПР08-ХН53БМТЮ.

В настоящее время Inconel 718 считается одним из самых востребованных материалов группы Inconel. Сплавы Inconel обладают стойкостью к окислению и коррозии, сохраняют прочность в широком диапазоне температур, поэтому применяются во многих отраслях промышленности.

На первом этапе испытаний необходимо было проверить материал на соответствие заявленным физико-химическим характеристикам. Из порошка Inconel 718 были напечатаны несколько испытательных образцов.

Термообработка привела к увеличению прочностных характеристик образцов, повышению твердости, снижению упругости и пластичности.

В результате испытаний были получены механические характеристики образцов, (предел прочности, модуль упругости, предел текучести, модуль упругости и др.) представленные в работе [1].

Результаты механических испытаний были признаны удовлетворительными. Было принято решение о переходе к следующему этапу исследований – печати спроектированных ранее камер РДМТ [2].

Попутно с изготовлением испытательных образцов обрабатывались режимы SLM-печати на принтере «Астра-420», предоставленном индустриальным партнером ООО «Полихром».

В результате обработки технологи печати были выявлены следующие особенности напечатанных камер:

- напечатанные изделия обладают изотропными механическими свойствами;
- стенки полученного изделия обладают внутренней пористостью;
- поверхность полученных изделий обладает повышенной шероховатостью [3];

В дальнейшем, корректировались режимы печати камер двигателя и были достигнуты удовлетворительные результаты по повышению качества изделий.

Следующим и самым главным этапом проводимых исследований является проведение огневых испытаний напечатанных камер в составе двигательной установки на испытательном стенде.

Одним из подготовительных мероприятий к огневым испытаниям является расчёт запаса прочности напечатанных камер [4].

Согласно теории прочности  $\sigma_{\text{экв}} \leq \sigma_{\text{В}}$ ;

Запас прочности при этом:

$$n = \sigma_{\text{В}} / \sigma_{\text{экв}};$$

Для оценки запаса прочности камеры двигателя, использовано уравнение Лапласа для тонкостенных оболочек вращения:

$$\sigma_m / \rho_m + \sigma_t / \rho_t = p / t,$$

где  $\rho_m$ ,  $\rho_t$  – радиусы кривизны срединной поверхности меридионального и кольцевого сечений на уровне рассматриваемой точки;  $p$  – испытываемое внутреннее давление;  $t$  – толщина стенки камеры.

Давление в камере = 1 МПа.

Так как камера сгорания представляет собой тонкостенный цилиндр, то для неё:

$$\sigma_m = p \cdot R / (2 \cdot t),$$

$$\sigma_t = p \cdot R / t,$$

здесь  $R$  – радиус камеры сгорания.

Согласно условию прочности Мизеса эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экв}}$  для нашей камеры сгорания определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_t^2 - \sigma_m \cdot \sigma_t} = 50,48 \text{ МПа} \leq \sigma_{\text{В}} = 1400 \text{ МПа}.$$

Тогда коэффициент запаса прочности будет равен  $n = 1400/50,48 = 27,73$

В результате эквивалентное напряжение меньше предела прочности материала камеры. Запас прочности получился удовлетворительным для изделий ракетно-космической техники (~ больше 2,5).

Окончательная оценка надёжности напечатанных камер РДМТ может быть дана по результатам огневых испытаний спроектированного РДМТ.

### Библиографические ссылки

1. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms /. International Materials Reviews. 2012, № 57 (3), P. 133–164.

2. Лихтнер А. С. Практическое исследование усадки 3D-печатных керамических деталей, изготовленных по DLP-процессу. [Электронный ресурс] // Аддитивные технологии № 2, 2023. С. 12-15. URL: <https://additiv-tech.ru/file/23368/download?token=wkHUjrls> (дата обращения 15.09.2023).

3. Электрохимическая обработка изделий аддитивного производства из металлов и сплавов [Электронный ресурс] / Е.В. Краснова, Б.П. Саушкин, И.А. Слюсарь, С.В. Смеян. // Аддитивные технологии № 2, 2023. С. 49-57. URL: <https://additiv-tech.ru/file/23368/download?token=wkHUrjrls> (дата обращения 15.09.2023).

4. Коломенцев А.И., Краев М.В., Назаров В.П. и др. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей. Красноярск, Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т; Моск. авиац.ин-т, 2006, 336 с.

### References

1. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms /. International Materials Reviews. 2012, № 57 (3), P. 133–164.

2. Likhtner A. S. Prakticheskoe issledovanie usadki 3D-pechatnykh keramicheskikh detalei, izgotovlennykh po DLP-protssessu. [Elektronnyi resurs] // Additivnye tekhnologii № 2, 2023. S. 12-15. URL: <https://additiv-tech.ru/file/23368/download?token=wkHUrjrls> (data obrashcheniya 15.09.2023).

3. Elektrokhimicheskaya obrabotka izdelii additivnogo proizvodstva iz metallov i splavov [Elektronnyi resurs] / E.V. Krasnova, B.P. Saushkin, I.A. Slyusar', S.V. Smeyan. // Additivnye tekhnologii № 2, 2023. S. 49-57. URL: <https://additiv-tech.ru/file/23368/download?token=wkHUrjrls> (data obrashcheniya 15.09.2023).

4. Kolomentsev A.I., Kraev M.V., Nazarov V.P. i dr. Ispytanie i obespechenie nadezhnosti raketnykh dvigatelei. Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosmich. un-t; Mosk. aviats.in-t, 2006, 336 s.

© Манохина Э. С., Шикарев М. А., 2023

УДК 629.7.036

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ И ДОВОДКА ЕЁ ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

С. А. Мельников\*, В. М. Зубанов\*, А. А. Харитонов, А. И. Щербань

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

\*E-mail: m.serg98@mail.ru

*В работе рассмотрено несколько вариантов расположения отверстий плёночного охлаждения рабочей лопатки в ходе доводки. Выбрана схема, обеспечивающая наиболее эффективное охлаждение проектируемой рабочей лопатки турбины.*

*Ключевые слова: турбина, охлаждение турбин, ГТД, охлаждаемая лопатка, плёночное охлаждение.*

## SIMULATION OF THE TEMPERATURE STATE OF THE TURBINE WORKING BLADE AND FINISHING OF ITS FILM COOLING

S. A. Melnikov\*, V. M. Zubanov, A. A. Kharitonova, A. I. Shcherban

Samara National Research University named after S.P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: m.serg98@mail.ru

*The paper considers several variants of the arrangement of holes for film cooling of the working blade during finishing. The scheme providing the most efficient cooling of the designed turbine working blade was selected.*

*Keywords: turbine, turbine cooling, GTE, cooled blade, film cooling.*

Рабочие лопатки турбины высокого давления (ТВД) современных двигателей являются одними из самых теплонапряженных деталей в газотурбинном двигателе (ГТД), в связи с чем задача их доводки по тепловому состоянию является актуальной при разработке современных ГТД. В качестве объекта исследования взята охлаждаемая рабочая лопатка первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя. Необходимо было решить проблему перегрева пера лопатки и обеспечить равномерное распределение температурного поля по лопатке. Для этого расположение отверстий для создания охлаждающей пленки на входной кромке изменялось, также исследовался эффект от добавления дополнительного ряда отверстий плёночного охлаждения в корыте лопатки, базовая геометрическая модель исследуемой лопатки показана на рис. 1.

В ходе работы в качестве доводочных мероприятий были выполнены следующие изменения геометрии:

1. Во-первых, изменялось расположение отверстий пленки на входной кромке, отверстия воздушной пленки близкие к корыту (третий ряд) перемещались в положение точки застоя на входной кромке, а второй ряд отверстий воздушной пленки перемещался аналогично к точке застоя, но со стороны спинки;

2. Во-вторых, был добавлен ряд охлаждения в средний канал внутренней системы охлаждения, чтобы создать завесу низкотемпературного воздуха на корыте исследуемой рабочей лопатки. В табл. 1 приведён перечень вариантов, рассмотренных в ходе доводки температурного состояния рабочей лопатки.

Сопряжённое моделирование выполнялось в составе ступени ТВД с учётом внутрискрепленного диффузора. Сеточные модели выполнялись на основе рекомендаций [1]. Подробно методика создания расчётной модели для выполнения сопряжённого моделирования описана в работе [2].

На рис. 2 приведено полученное в ходе исследования температурное состояние по наиболее перспективным вариантам. В варианте 2 удалось снизить температуру на входной кромке лопатки. Именно эта конфигурация отверстий (полученная в варианте 2) была использована при создании варианта 4, путём добавления корытного ряда.

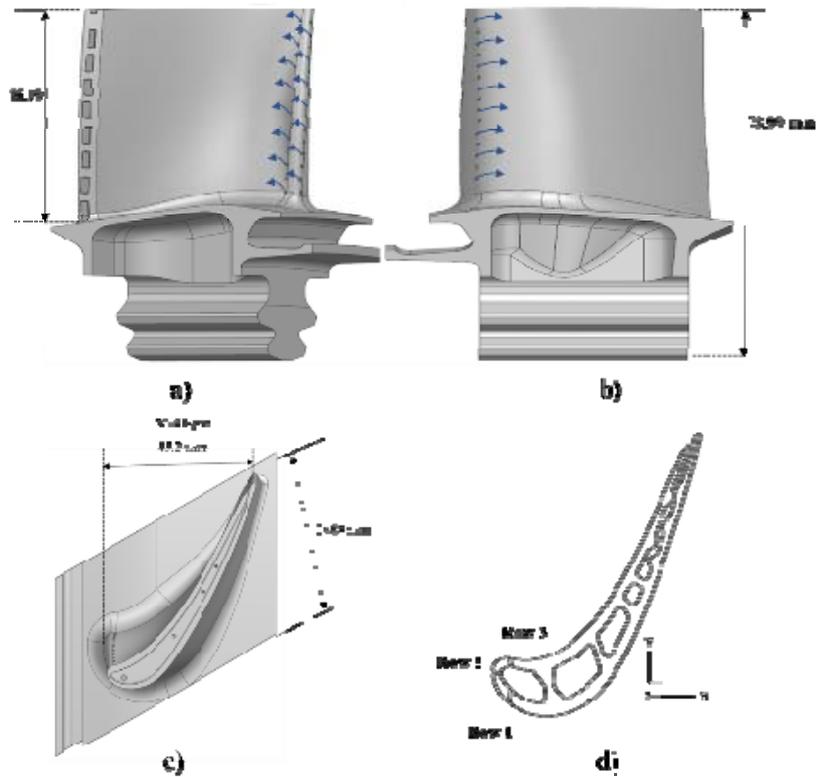


Рис. 1. Вид на рабочую лопатку со стороны корыта (а); вид на рабочую лопатку со стороны спинки (б); втулочная трактовая полка и кончик пера (в); сечение лопатки, в котором видно расположение рядов отверстий (г)

Таблица 1

Описание вариантов, рассмотренных в ходе исследования

	Базовая геометрия	Вариант 1 (Case 1)	Вариант 2 (Case 2)	Вариант 3 (Case 3)	Вариант 4 (Case 4)
Смещения второго ряда (Row2) (mm)	-	-Y=1	-	-	-
Смещения третьего ряда (Row3) (mm)	-	-	+X=1	+X=1	+X=1
Добавление отверстий в корыте под разным углом	-	-	-	Радиальный угол 45°	Осевой угол 10° Радиальный угол 45°

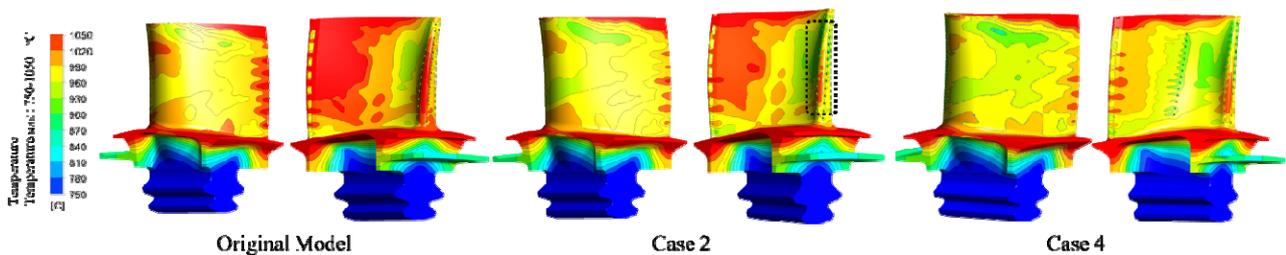


Рис. 2. Температурное поле по поверхности лопатки

На основе данных, изображённых на рис. 2 можно сделать вывод, что введённые мероприятия значительно улучшили температурное состояние лопатки, особенно на корыте, в области выходной кромки. При это стоит отметить, что введение дополнительно ряда на корыте не нарушило работу всей схемы охлаждения.

При анализе всех посчитанных вариантов выявлено постоянство распределения статического давления по наружному профилю лопатки, даже при добавлении корытного ряда и перемещении рядов охлаждения на входной кромке. Таким образом, за счёт корректировки схемы плёночного охлаждения лопатки удалось улучшить температурное состояние пера лопатки, охладив перегретые зоны в области корыта и входной кромки.

### Библиографические ссылки

1. Volkov A., Zubanov V., Matveev V. etc. Rational Settings of a Numerical Model to Simulate the Working Process of an Axial-Film-Cooled Turbine Blade // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Re-search 2022. Vol. 11. Issue 12. № 12. P. 901–907.

2. Матвеев В.Н., Мельников С.А., Попов Г.М. и др. Результаты сопряжённого моделирования и анализа теплового состояния рабочей лопатки турбины высокого давления // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 1. С. 98-111.

### References

1. Volkov A., Zubanov V., Matveev V. etc. Rational Settings of a Numerical Model to Simulate the Working Process of an Axial-Film-Cooled Turbine Blade // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Re-search 2022. Vol. 11. Issue 12. № 12. P. 901–907.

2. Matveev V. N., Melnikov S. A., Popov G.M. etc. *Rezultati Sopryazgennogo Modelirovaniya i Analiza Teplovogo Sostoyaniya Rabochey Lopatki Turbini Visokogo Davleniya* [Results of coupled modeling and analysis of the thermal state of the working blade of a high-pressure turbine] // *Vestnik Samarskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya Technika, Tehnologii i Mashonostroyeniye* [Journal of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering]. 2023. Vol.22, № 1. С. 98-111.

© Мельников С. А., Зубанов В. М., Харитонов А. А., Щербань А. И., 2023

УДК 621.454

**ИННОВАЦИОННЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАЗРАБОТАННЫХ ПОД РУКОВОДСТВОМ А. М. ИСАЕВА**

В. П. Назаров<sup>1\*</sup>, В. А. Моисеев<sup>2</sup>, В. Ю. Пиунов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5

<sup>3</sup> АО «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»  
Российская Федерация, 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, д.24

\*E-mail: nazarov@sibsau.ru

*Рассмотрены инновационные конструкторские решения и прогрессивные технологии производства ЖРД, разработанных под руководством А.М.Исаева, которые изготавливались на предприятиях Сибирского региона.*

*Ключевые слова: конструкция ЖРД, технологии производства изделий ракетной техники.*

**INNOVATIVE DESIGN SOLUTIONS AND ADVANCED TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF LIQUID ROCKET ENGINES DEVELOPED UNDER THE LEADERSHIP OF A. M. ISAEV**

V. P. Nazarov<sup>1\*</sup>, V. A. Moiseev<sup>2</sup>, V. Yu. Piunov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

5, 2nd Baumanckaya Ave, Moscow, 105005, Russian Federation

<sup>3</sup> JSC «Scientific and Production Association named after S. A. Lavochkin»

24, Leningradskaya Ave, Khimki, 141402, Russian Federation

E-mail: nazarov@sibsau.ru

*Innovative design solutions and progressive technologies for the production of liquid propellant engines developed under the leadership of A. M. Isaev which were manufactured at the enterprises of the Siberian region are considered.*

*Keywords: the design of the LRE, technologies for the production of rocket technology products.*

В октябре 2023 года исполнилось 115 лет со дня рождения А.М. Исаева (1908-1971 гг.), выдающегося конструктора ракетно-космических двигателей, одного из основоположников отечественной космонавтики, Героя Социалистического труда, лауреата Ленинской и Государственных премий СССР, доктора технических наук. Возглавляемый А. М. Исаевым коллектив конструкторского бюро химического машиностроения (ныне АО «КБХиммаш») создавал ракетные двигатели и двигательные установки (ДУ), которые участвовали во всех космических полетах ракет-носителей, пилотируемых космических аппаратов и космических станций. Разработанные КБХиммаш им. А. М. Исаева ракетные двигатели обеспечивали выполнение широкой программы научных исследований, проводившихся на космических кораблях и орбитальных станциях, доставку, образцов лунного грунта на Землю и посадку «Луноходов» на поверхность Луны. К числу приоритетных достижений коллектива, руководимого А. М. Исаевым, относится создание первого в нашей стране кислородно-водородного двигателя (КВД) для разгонного блока и двигателей для баллистических ракет морского подводного базирования.

Ракетные двигатели, разработанные КБХиммаш под руководством А.М.Исаева, изготавливались на целом ряде предприятий ракетно-космической промышленности, в том числе на предприятиях Сибирского и Уральского регионов. В данной публикации рассматриваются некоторые инновационные конструкторские решения и прогрессивные технологии, которые использовались при производстве ЖРД на Красноярском машиностроительном заводе и ОКБ-10 (ныне АО «Решетнев»).

Начало совместной работы этих трех предприятий относится к 1961 году, когда правительственными органами было принято решение о создании универсальной двухступенчатой ракеты для выведения на круговые и эллиптические орбиты космических аппаратов массой от 100 до 1500 кг. гражданского и военного назначения.

Проектирование ракеты 11К65 (65С3) было поручено ОКБ-10 под руководством М.Ф. Решетнева и осуществлялось путем трансформации боевой одноступенчатой ракеты Р-14(8К65), изготавливаемой на заводе «Красмаш» [1].

Для второй ступени носителя ОКБ-2 (ныне КБХиммаш) под руководством А.М.Исаева был разработан двигатель 11Д47, который должен был обеспечивать вывод второй ступени с полезной нагрузкой на расчетную эллиптическую орбиту; ориентацию ступени к апогею эллиптической орбиты; повторный запуск двигателя и перевод космического аппарата на заданную круговую орбиту. Конструкторами ОКБ-10 была разработана система малой тяги, обеспечивающей стабилизированный полет между двумя включениями маршевого ЖРД. Основной объем работ по конструкторско-технологической отработке ракет-носителей 11К65 и двигателей 11Д49 осуществлялся на Красноярском машиностроительном заводе.

Затем ракета и двигатель второй ступени были модернизированы и получили новые индексы: ракета-носитель 11К65М, двигатель 11Д47.

При постановке на производство двигателя 11Д47 (11Д49) на заводе «Красмаш» были освоены и внедрены сложные технологические процессы, которые в те годы являлись по-настоящему новаторскими и передовыми. В частности, разработана технология сборки нежесткого высотного сопла с открытыми гофрами и его пайка в индукционной камерной печи. Впервые изготовление газовой турбины ТНА осуществлялось из цельной заготовки жаропрочного сплава с обработкой лопаток электроэрозионным методом с последующей напайкой бандажного кольца. Разработана технология балансировки ротора и сборки сложного турбонасосного агрегата с обеспечением герметичности в комбинированном контактно-уплотнении.

Ракета-носитель 11К65М серийно изготавливалась на Красмаше до 1971 г. Затем, в связи с освоением предприятием принципиально новых изделий ракетной техники, изготовление 11К65М было передано в ПО «Полет» (г. Омск). При этом производство двигателей 11Д49 для ракеты осталось на Красмаше в связи с его сложностью. В дальнейшем ракета-носитель получила название «Космос-3М» и изготавливалась до 1992 г. Она была признана одной из самых надежных космических ракет-носителей в мире[2].

В середине 1960-ых гг. на Красмаше началось изготовление космической двигательной установки 11Д414, разработанной в КБХиммаш. Красмашевские специалисты с большой ответственностью и профессиональным интересом отнеслись к новому заказу и возможностью продолжения работы с конструкторской организацией А.М.Исаева.

Двигательная установка 11Д414 состоит из однокамерного ЖРД 11Д429 (С5.55), конического корпуса с расположенным внутри сферическим топливным баком и системы топливоподдачи с шарми-баллонами для хранения сжатого газа – азота. Она изготавливалась в двух вариантах: с жестким креплением камеры двигателя и креплением камеры в карданном подвесе, обеспечивающим отклонение камера в двух плоскостях. Срок активного существования двигателя на орбите составлял 1 год, число включений – пять. ДУ предназначалась для работы в условиях вакуума и невесомости, поэтому разработчиками были установлены повышенные требования по герметичности изделия. В связи с этим на заводе «Красмаш» была создана новая производственно-технологическая система пневмовакуумных испытаний, оснащенная необходимым оборудованием.

Исключительно удачная конструкция ДУ обеспечила ее широкое использование в составе космических аппаратов научно-исследовательского, военного и гражданского назначения [3]. В качестве корректирующей ДУ (под индексом КДУ-414) она устанавливалась на искусственные спутники Земли типа «Молния».

На космических аппаратах специального назначения типа «Зенит» двигательная установка 11Д414 использовалась в качестве тормозной установки (ТДУ-414), которая обеспечивала уменьшение скорости полета спутника, переход его на низкую круговую орбиту, фотографирование определенного участка земной поверхности и посадку на Землю. В варианте тормозной двигательной установке камера двигателя 11Д429 была жестко закреплена на раме ДУ.

С 1965 г. начался новый этап совместной работы красноярских машиностроителей с главным конструктором А.М.Исаевым и его коллективом. В соответствии с постановлением Правительства на Красмаше было развернуто серийное производство морских одноступенчатых ракет Р-27 средней дальности, которое осуществлялось в кооперации со Златоуставским машиностроительным заводом [4].

Впервые в мировой практике ракетостроения главными конструкторами А.М.Исаевым и В.П. Макеевым была разработана и реализована принципиально новая конструкция ракеты с двигателем, расположенным («кутопленным») в баке жидкого компонента топлива. Это инновационное конструкторское решение определило облик следующих поколений морских ракет.

Двигатель ракет Р-27 состоит из центрального однокамерного блока, работающего по замкнутой схеме и двухкамерного рулевого блока открытой схемы. В двигателе исключены все разъемные соединения, которые заменены сваркой.

При изготовлении двигателя на заводе Красмаш отработаны и внедрены технологии электронно-лучевой сварки медной огневой стенки камеры сгорания и стальной стенки сопла, плазменного нанесения теплозащитного покрытия (двуокись циркония) на внутреннюю поверхность камеры сгорания, вакуумные испытания на герметичность отдельных блоков и двигателя в целом и другие передовые технологии того времени.

На базе достигнутых конструкторских и технологических решений вслед за двигателем 4Д10 на заводе началось освоение и производство двигателей 4Д75 (первая ступень) и 4Д76 (вторая ступень), разработанных в КБХиммаш для новой двухступенчатой межконтинентальной морской ракеты Р-29. Это были последние двигатели, которые изготавливались на Красмаше при жизни А.И.Исаева.

Двигатели отличались повышенной сложностью, плотностью компоновки, высокими требованиями по герметичности и надежности, поскольку циклограмма их выхода на режим обеспечивалась собственной автоматикой[5].

А.М.Исаев неоднократно бывал на заводе, активно участвовал в постановке двигателей высокой технологичности своих двигателей. Его отличительной чертой было внимательное отношение к предложениям и замечаниям заводчан, простота в общении с людьми, доступность и коммуникабельность.

Одному из авторов данной публикации, В.А.Моисееву посчастливилось встречаться с А.М.Исаевым при обсуждении сложных технических вопросов обеспечения работоспособности и надежности узлов двигательной автоматики. Предложения молодого (в те годы) инженера были поддержаны и приняты Главным конструктором и реализованы при корректировке конструкторской документации.

Совместная напряженная творческая работа коллективов КБХиммаш и завода Красмаш, у истоков которой стояла могучая личность Главного конструктора А.М.Исаева, продолжается и в настоящее время.

### Библиографические ссылки

1. Сибирская дорога в космос: под общей редакцией Н.А. Тестоедова; Красноярск: «Платина плюс», 2009. 128 с., ил.
2. Назаров В.П., Ефремов Г.В. Конструкция жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич.ун-т. Красноярск, 2016.-194 с. + прил.: Альбом принципиальных схем.
- 3.Куприянов В.К., Чернышев В.В. И вечный старт... М:Реарт, 2018.- 216 с., илл.
4. Каталог. Баллистические ракеты морских стратегических ядерных сил СССР и России 1947-2012. М: Ихдательский дом «Оружие и технологии», 2012. 108 с.; ил.
5. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин и др.; Под общ. Ред. Г.Г.Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.: ил.

### References

1. Siberian road to space: under the general editorship N. A. Testoedova. Krasnoyarsk: "Platinum Plus", 2009. 128 p., ill.
2. Nazarov, V. I. Design of liquid rocket engines: textbook. allowance / V. P. Nazarov, G. V. Efremov; Sib. state aerospace univ. Krasno-Yarsk, 2016. 194 p. + adj.: Album of circuit diagrams.
3. Kupriyanov V.K., Chernyshev V.V. And an eternal start.. M: Reart, 2018. 216 pp., illus.
4. Catalog. Ballistic missiles of the naval strategic nuclear forces of the USSR and Russia 1947-2012. M: Publishing House "Weapons and Technologies", 2012.-108 p.; ill.
6. Construction and design of liquid rocket engines. Textbook for university students specializing in "Aircraft engines and power plants" / G. G. Takhun, V. I. Baulin, V. A. Volodin and others; Under general ed. G. G. Gahuna. M.: Mechanical Engineering, 1989 424 pp.: ill.

УДК 621.45.01

## ПОДБОР ДАТЧИКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ\*

Ю. Д. Новикова, А. Д. Прошлецов, А. С. Аргумбаев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

\*E-mail: novikova@ssau.ru

*Данная работа посвящена подбору датчиков крутящего момента для малоразмерной газотурбинной установки с параметрами 15 Нм и 50 000 об/мин. Приведен обзор датчиков, принципы их работы и выполнен анализ полученных результатов.*

*Ключевые слова: малоразмерная газотурбинная установка, датчик крутящего момента, тензомост, телеметрический способ, контактная схема, концентратор деформаций, погрешность.*

## SELECTION OF A TORQUE SENSOR FOR A SMALL-SIZED GAS TURBINE INSTALLATION

Yu. D. Novikova, A. D. Proshletsov, A. S. Argumbaev

Samara National Research University named after S.P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: novikova@ssau.ru

*This work is devoted to the selection of torque sensors for a small-sized gas turbine plant with parameters of 15 Nm and 50,000 rpm. An overview of the sensors, the principles of their operation is given and the analysis of the results obtained is performed.*

*Keywords: small-sized gas turbine unit, torque sensor, strain gauge, telemetry method, contact circuit, strain concentrator, error.*

Энергетические малоразмерные газотурбинные установки (МГТУ) относятся к устройствам для децентрализованной генерации электрической энергии, а также тепловой энергии. Другими словами – это генераторы энергии на месте потребления. Согласно оценке показателей импорта МГТУ за период с 2015 по 2020 годы (по кодам ТН ВЭД 1 8502 39 200 0 – Турбогенераторы и 2 8411 81 000 8 – Турбины газовые прочие, мощностью не более 5000 квт, прочие) в РФ было ввезено оборудования на сумму 1 389,502 млн. рублей что соответствует 20,170 млн. долл. США. Поставки осуществлялись из США и Германии. Более 90% от импорта в натуральном выражении и 82% в стоимостном занимает продукция компании Capstone Turbine Corporation (США). В настоящий момент на территории Российской федерации отсутствует производство МГТУ мощностью до 500 кВт, при этом существенно усложнился процесс поставок и выросла их стоимость. В связи с этим создание производства МГТУ мощностью до 500 кВт на территории РФ является актуальной и важной задачей.

Целью данной работы было подобрать оборудование для измерения крутящего момента при производстве МГТУ с параметрами: номинальный крутящий момент равен 15 Нм; частотой вращения ротора равна 50 000 об/мин.

Большинство представленных в настоящее время на рынке датчиков крутящего момента работают по схеме тензомоста (рис. 1). Основу тензодатчика составляет тензорезистор, оснащенный специальными контактами, закрепленными на передней части измерительной панели.

---

\* Работа выполнена по проекту FSSS-2022-0019, реализуемого в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок», результат «Созданы новые лаборатории, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей».

По этому принципу работают датчики следующих производителей:

1. ООО «ТИЛКОМ» (республика Беларусь). Датчики серий: M40, M20C, M26, M25 [1]. 2. Magtrol (Швейцария). Датчики серий RT [2]. 3. KYOWA (Япония). Датчики серий TP-M, TPS-A, TPН-A [3]. 4. DACELL (Южная Корея). Датчики серий: TRC, TRD, TRE, TCN [4]. 5. Datum Electronics Limited (Великобритания). Датчики серий: FF425, RS425 [5]. 6. Lorenz (Германия). Датчики серий: DR-2112, DR-3000, DR-2800 [6]. 7. SETech (Южная Корея). Датчики серий: YDH, YDR [7]. 8. HBM (Германия). Датчики серий: T10F, T12, T40FH [8].

В результате проведенного обзора датчиков момента, представленных в РФ, был найден только один датчик, подходящий под заявленные требования: датчики серий ТМ производства компании Magtrol (Швейцария), работающий по уникальной технологии [2].

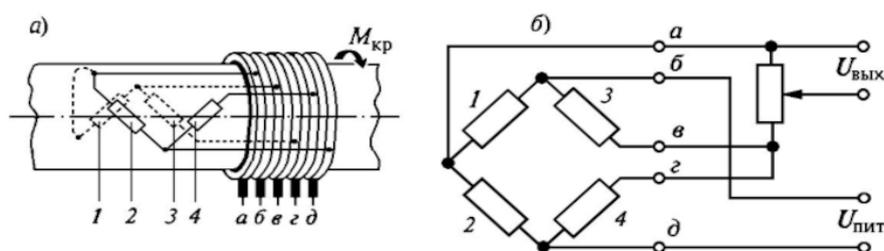


Рис. 1. Типовая конструкция датчика с тензомостом

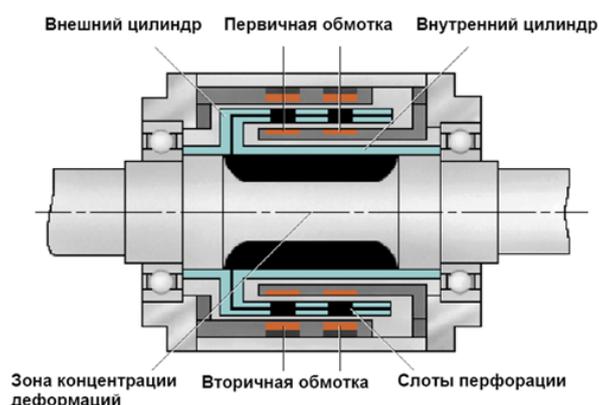


Рис. 2. Схема датчика Magtrol

Согласно коммерческому предложению официального представителя фирмы Magtrol в России стоимость подходящего датчика ТМНС 308/51 на момент выхода публикации составит более 2 млн. руб. не включая сопутствующее оборудование.

Таким образом, можно сделать вывод, что для измерения крутящего момента 15 Нм при частоте вращения ротора 50 000 об/мин подходит датчик ТМНС 308/51 производства фирмы Magtrol (Швейцария). В связи с высокой стоимостью датчика и сопутствующего оборудования целесообразность его применения необходимо определять при калькуляции цены всей установки. При этом стоит рассмотреть вариант определения мощности с помощью параметров электрического тока.

### Библиографические ссылки

1. ООО «Тилком»: [Электронный ресурс]. URL: <https://tilkom.com/>. (Дата обращения: 30.08.2023).
2. Официальный сайт компании «Magtrol»: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.magtrol.ru/>. (Дата обращения: 30.08.2023).
3. Официальный сайт компании «KYOWA Electronic Instruments Co., Ltd.» [Электронный ресурс]. URL: <http://kyowa.ru/>. (Дата обращения: 30.08.2023).
4. Официальный сайт компании «Dacell» [Электронный ресурс]. URL: <http://dacell.ru/datchiki-krutyashego-momenta/>. (Дата обращения: 30.08.2023).

5. Официальный сайт компании «Datum Electronics Ltd.»: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.datum-electronics.ru/> . (Дата обращения: 30.08.2023).
6. Официальный сайт компании «Lorenz» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.lorenzm.ru/index.php%3Foption%3Dcom\\_content%26view%3Darticle%26id%3D3%26Itemid%3D105](http://www.lorenzm.ru/index.php%3Foption%3Dcom_content%26view%3Darticle%26id%3D3%26Itemid%3D105) . (Дата обращения: 30.08.2023).
7. Официальный сайт компании «SETech» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hbm.com/en/> . (Дата обращения: 30.08.2023).
8. Официальный сайт компании «HBM» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hbm.com/en/> . (Дата обращения: 30.08.2023).

### References

1. LLC "Tilcom": [Electronic resource]. URL: <https://tilkom.com/>. (Date of reference: 30.08.2023).
2. Official website of the company "Magtrol": [Electronic resource]. URL: <https://www.magtrol.ru/> . (Accessed: 30.08.2023).
3. Official website of the company "KYOWA Electronic Instruments Co., Ltd." [Electronic resource]. URL: <http://kyowa.ru/> . (Date of reference: 30.08.2023).
4. The official website of the Dacell company [Electronic resource]. URL: <http://dacell.ru/datchiki-krutyashego-momenta/> . (Accessed: 30.08.2023).
5. Official website of the company "Datum Electronics Ltd.": [Electronic resource]. URL: <https://www.datum-electronics.ru/> . (Date of reference: 30.08.2023).
6. The official website of the company "Lorenz" [Electronic resource]. URL: [http://www.lorenzm.ru/index.php%3Foption%3Dcom\\_content%26view%3Darticle%26id%3D3%26Itemid%3D105](http://www.lorenzm.ru/index.php%3Foption%3Dcom_content%26view%3Darticle%26id%3D3%26Itemid%3D105) . (Date of reference: 30.08.2023).
7. The official website of the company "SETech" [Electronic resource]. URL: <https://www.hbm.com/en/> . (Accessed: 30.08.2023).
8. The official website of the NVM company [Electronic resource]. URL: <https://www.hbm.com/en/> . (Accessed: 30.08.2023).

© Новикова Ю. Д., Прошлецов А. Д., Аргумбаев А. С., 2023

УДК 621.787: 539.319

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

В. Ф. Павлов, В. П. Сазанов, В. С. Вакулюк, О. Ю. Семёнова, А. Ю. Морозов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
E-mail: sopromat@ssau.ru

*Исследовалось влияние остаточных напряжений на предел выносливости цилиндрических деталей с надрезами из сталей 40X, 30ХГСА после гидродробеструйной обработки. Эта обработка используется для деталей двигателей авиационной техники.*

*Ключевые слова: остаточные напряжения, предел выносливости, детали с концентраторами напряжений.*

## A STUDY OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE ENDURANCE LIMIT OF PARTS WITH STRESS CONCENTRATORS

V. F. Pavlov, V. P. Sazanov, V. S. Vakulyuk, O. Yu. Semyonova, A. Yu. Morozov

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: sopromat@ssau.ru

*The influence of residual stresses on the endurance limit of cylindrical parts made of steels 40X and 30ХГСА with cuts after hydro-shot blasting has been studied. This type of hardening is used for parts of aerospace technique engines.*

*Keywords: residual stresses, endurance limit, parts with stress concentrators.*

Применение различных методов поверхностного пластического деформирования (ППД) деталей приводит к существенному повышению сопротивления усталости. В исследовании использовались сплошные и полые цилиндрические детали с наружным диаметром  $D$  и диаметром отверстия  $d$  из сталей 40X, 30ХГСА после гидродробеструйной обработки (ГДО). Оценка влияния ГДО на приращение предела выносливости деталей при изгибе  $\Delta\sigma_{-1}$  в случае симметричного цикла с применением критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  [1] проводилась по формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\Psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|, \quad (1)$$

где  $\bar{\Psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали по критерию  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ ;

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (2)$$

$\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по глубине поверхностного слоя  $y$ ;  $\xi = y/t_{\text{кр}}$  – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{\text{кр}}$ ;  $t_{\text{кр}}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, которая определяется размерами опасного поперечного сечения детали [2, 3].

Из зависимостей (1) и (2) видно, что для оценки приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  следует определить коэффициент  $\bar{\Psi}_{\sigma}$  влияния ГДО на предел выносливости и распределение осевых  $\sigma_z$  ос-

таточных напряжений по глубине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. В работе [4] было установлено, что коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  при симметричном цикле определяется только степенью концентрации напряжений и вычисляется по следующей зависимости:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (3)$$

где  $\alpha_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения после ГДО определялись на образцах-свидетелях методом колец и полосок [5]. Половина гладких деталей для испытаний на усталость после изготовления подвергалась электрополированию, другая – ГДО на режимах, характерных для практики аэрокосмических предприятий. На гладкие неупрочнённые и упрочнённые детали безнаклёпным способом с применением электрополирования наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусом  $R = 0,3$  мм.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  рассчитывался по формуле (2) по глубине поверхностного слоя опасного сечения деталей с надрезами, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. При расчёте критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  использовались осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в деталях с надрезами  $R = 0,3$  мм. Значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  влияния ГДО на приращение предела выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялись по зависимости (3).

По формуле (1) определялись значения приращений пределов выносливости  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  упрочнённых ГДО деталей с надрезами. Значения коэффициентов  $\alpha_\sigma$  и  $\bar{\psi}_\sigma$ , среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , приращений предела выносливости за счёт ГДО по результатам эксперимента  $(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$  и расчёта  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , глубин нераспространяющихся трещин усталости  $t_{кр}$  представлены в таблице.

#### Результаты расчётного и экспериментального определения приращений пределов выносливости упрочнённых деталей с надрезами

Материал	$D$ , мм	$d$ , мм	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$ , МПа	Расхождение, %
40X	25	0	0,527	-109	2,9	0,377	41,1	42,5	3
	25	10	0,504	-110	2,9	0,377	41,4	42,5	3
	25	19	0,380	-117	3,0	0,369	43,2	40,0	8
30ХГСА	10	0	0,203	-240	2,7	0,393	94,0	90,0	5
	15	0	0,311	-196	2,8	0,385	75,5	77,5	3
	15	5	0,303	-211	2,8	0,385	81,3	77,5	5
	15	10	0,249	-218	2,9	0,377	82,1	80,0	3

Из представленных в таблице данных видно, что результаты испытаний на усталость неупрочнённых и упрочнённых деталей имеют достаточно высокую сходимость с результатами расчёта приращений пределов выносливости (расхождение не превышает 8%). Из полученных результатов следует, что для всех исследованных типоразмеров деталей из сталей 40X и 30ХГСА приращение предела выносливости за счёт ГДО пропорционально значению среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ . Поэтому выбор режимов упрочнения деталей при ГДО необходимо назначать из условия получения наибольшей величины среднеинтегральных остаточных напряжений.

#### Библиографические ссылки

1. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.

2. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали. // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-25.

3. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали. // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 12. С. 37-40.

4. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов и др. // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15. № 4 (44). С. 81-85.

5. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32-42.

### References

1. Pavlov V.F. *O svyazi ostatochnyh napryazhenij i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviyah koncentracii napryazhenij* [On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions]. *Izvestiya vusov. Mashinostroeniye*. 1986, no. 8, pp. 29-32. (in Russ.).

2. Pavlov V.F. *Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnyh napryazhenij v poverhnostnom sloe detali s koncentratorom. Soobshchenie I. Sploshnye detali* [The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 1. Solid parts]. *Izvestiya vusov. Mashinostroeniye*. 1988, no. 8, pp. 22-25. (in Russ.).

3. Pavlov V.F. *Vliyanie na predel vynoslivosti velichiny i raspredeleniya ostatochnyh napryazhenij v poverhnostnom sloe detali s koncentratorom. Soobshchenie II. Polye detali* [The influence of residual stresses in a part with a concentrator surface layer value and distribution on the endurance limit. Report 2. Hollow parts]. *Izvestiya vusov. Mashinostroeniye*. 1988, no. 12, pp. 37-40. (in Russ.).

4. Kirpichyov V.A., Bukaty A.S., Filatov A.P., Chirkov A.V. *Prognozirovanie predela vynoslivosti poverhnostno uprochnyonnyh detalej pri razlichnoj stepeni koncentracii napryazhenij* [The prediction of hardened parts endurance limit under stresses concentration various degree]. *Ufa State Aviation Technical University bulletin*. 2011, vol. 15, no.4 (44), pp. 81-85. (in Russ.)

5. Ivanov S.I. *K opredeleniyu ostatochnyh napryazhenij v cilindre metodom kolec i polosok. Ostatochnye napryazheniya* [On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method. Residual stresses]. *Kuibyshev: KuAI*. 1971, issue 53, pp. 32-42. (in Russ.).

© Павлов В. Ф., Сазанов В. П., Вакулюк В. С., Семёнова О. Ю., Морозов А. Ю., 2023

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ ГАЗОВЫХ ОДНОСТУПЕНЧАТЫХ ОСЕВЫХ ТУРБИН ЖРД

В. Ю. Панасенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: hokinvadim@gmail.com

*Методы исследования работы моделей газовых одноступенчатых осевых турбин жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) рассматриваются с целью оптимизации проектирования и повышения эффективности работы турбины.*

*Ключевые слова: газовые турбины ЖРД, методы исследования, улучшения исследований.*

## METHODS FOR INVESTIGATING THE OPERATION OF MODELS OF GAS SINGLE-STAGE AXIAL TURBINES OF THE LRE

V. Y. Panasenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: hokinvadim@gmail.com

*Methods of investigation of the operation of models of gas single-stage axial turbines of liquid rocket engines (LRE) are considered in order to optimize the design and improve the efficiency of the turbine.*

*Keywords: LRE gas turbines, research methods, research improvements.*

В данной статье автором рассмотрены улучшения, связанные с исследованием утечек через радиальные уплотнения. Они являются важными элементами устройства газовых турбин, поэтому данная тема является довольно актуальной в настоящее время [1].

Изучение теплопередачи от продуктов сгорания (ПГ) к рабочему колесу и корпусу газовых турбин жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является актуальной задачей. Решение задачи обтекания, учитывающей теплообмен, во вращательных потоках, в проточных частях турбонасосных агрегатов (ТПУ) ракетного двигателя, осуществляется следующими методами: численными методами; аналитическим подходом, при решении уравнений динамического и температурного пограничных слоев; а также как с использованием эмпирических зависимостей. Температурный параметр газообразных продуктов сгорания и, как следствие, теплообмен между продуктами сгорания и конструктивными элементами проточной части существенно влияет на рабочие и энергетические характеристики ЖРД из ТПУ. При проектировании газовых турбин ЖРД необходимо учитывать наличие процессов теплообмена, распределение температуры рабочей жидкости и температуры конструктивных элементов в полостях ЖРД из ТПУ (поскольку потери энергии и вязкость зависят от температур рабочей жидкости, а также определяют параметры потока). Распределение температуры в конструктивных элементах определяет производительность и надежность агрегата. В случае использования компонентов криогенного топлива в ЖРД-установках нагрев компонента приводит к реализации кавитационных режимов и падению эксплуатационных и энергетических характеристик. С другой стороны, пониженная температура рабочей жидкости приводит к повышенной вязкости компонентов и, как следствие, снижению КПД агрегата (особенно при использовании гелеобразных компонентов). При исследовании теплообмена в поле центробежных сил для элементов газовых турбин ракетных двигателей необходимо получить совместное решение уравнений динамического и температурного пограничных слоев в граничных условиях проточных частей. В данной статье авторы предлагают модель распре-

деления динамического и температурного пограничных слоев с учетом конвективной составляющей (для случая газообразного рабочего тела, т. е.  $Pr < 1$ ), что необходимо для аналитического решения и определения коэффициента теплопередачи в граничных условиях проточных полостей турбины ЖРД. Аналитически получено уравнение энергии для граничных условий температурного пограничного слоя, которое допускает интегрирование по поверхности любой формы, что необходимо при определении толщины потери энергии [2].

Процессе проектирования газовых турбин необходимо проведение одномерного расчета ступеней с целью оценки предварительной величины КПД и параметров лопаточных венцов для последующего профилирования лопаток. Современные высокотемпературные газовые турбины характеризуются сильным влиянием систем охлаждения и вязких концевых эффектов в проточной части на параметры лопаточных венцов. Данные эффекты необходимо учитывать уже на стадии одномерного расчета ступени. Методика одномерного расчета ступени турбины была усовершенствована с учетом накопленного практического опыта по изучению характеристик лопаточных венцов современных венцов. В расчет рабочих процессов в сопловом аппарате и рабочем колесе введены соответствующие поправки, которые позволяют получать величину КПД ступени, соответствующую реальным характеристикам ступеней. Программа позволяет по минимальному набору исходных данных определить параметры рабочего тела в характерных сечениях проточной части ступени, определить коэффициенты потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе, оценить вероятное значение КПД ступени. Программа позволяет учитывать конструктивные особенности ступени: законы профилирования лопаток, наличие или отсутствие бандажной полки, наличие системы управления радиальным зазором, систем охлаждения лопаток рабочего колеса и соплового аппарата [3].

Программа, представленная автором предназначена для автоматического построения САД/САЕ-моделей рабочих лопаток центробежных компрессоров без привлечения САД/САМ-пакетов. Программа может использоваться для автоматизации эскизного проектирования неохлаждаемых рабочих лопаток центробежных компрессоров и газовых турбин. Программа является надстройкой для группы программных продуктов ANSYS. Функциональные возможности программы: реализовано автоматическое построение САЕ-моделей, осуществляемое на основе аэродинамических профилей лопатки без привлечения САД/САМ-пакетов или ее САД-модели предварительно импортированной в ANSYS Mechanical APDL. Тип ЭВМ: Программа является надстройкой для КЭ пакета ANSYS [4].

Создание новых поколений газотурбинных двигателей при условии сокращения сроков и затрат на их проектирование определяет необходимость разработки аналитических методов расчета и исследования температурного состояния лопаток газотурбинных двигателей в направлении формирования расчетных моделей, повышающих точность расчетов при минимизации трудоемкости их реализации. В связи с этим для повышения эффективности создания газотурбинного двигателя целесообразно применять комплексный подход к аналитическому исследованию температурного состояния охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток турбины, основанный на разработке метода регулирования объема [5].

Приведенные методы актуальны и эффективны для улучшения и создания газовых одноступенчатых осевых турбин жидкостных ракетных двигателей.

### Библиографические ссылки

1. Евдокимов, Д. В. Методы исследования различных радиальных уплотнений осевых газовых турбин / Д. В. Евдокимов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 11–15 апреля 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. С. 176-178. EDN LBJUQQ.
2. Зуев, А. А. Теплообмен в поле центробежных сил элементов газовых турбин / А. А. Зуев, А. А. Арнольд, Е. В. Ходенкова // Сибирский научно-технический журнал. 2020. Том 21, № 3. С. 364-376. DOI 10.31772/2587-6066-2020-21-3-364-376. EDN YFLDNC.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617718 Российская Федерация. Расчет ступени осевой газовой турбины: № 2020616646: заявл. 26.06.2020: опублик. 10.07.2020 / В. В. Вятков, А. М. Тошаков; заявитель Федеральное государственное бюджетное обра-

зовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева». EDN GMFNSZ.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663311 Российская Федерация. Программа автоматической генерации CAD/CAE моделей неохлаждаемых рабочих лопаток осевых компрессоров и газовых турбин (BGen): № 2023662080: заявл. 10.06.2023: опубл. 21.06.2023 / А. И. Грищенко. EDN WUSQZV.

5. Жирова, Е. С. Разработка методики расчета и исследования температурного состояния лопаток газовых турбин / Е. С. Жирова, С. В. Фефелова, А. Ф. Ибатуллина // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 48. С. 1448-1453. EDN PZJPZD.

### References

1. Evdokimov, D. V. Methods of investigation of various radial seals of axial gas turbines / D. V. Evdokimov // Actual problems of aviation and cosmonautics: Collection of materials of the VIII International scientific and practical conference dedicated to the Day of Cosmonautics. In 3 volumes, Krasnoyarsk, April 11-15, 2022 / Under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Volume 1. Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2022. pp. 176-178. EDN LBJUQQ.

2. Zuev, A. A. Heat transfer in the centrifugal force field for gas turbines elements / A. A. Zuev, A. A. Arngold, E. V. Khodenkova // Siberian Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 21, No. 3. P. 364-376. DOI 10.31772/2587-6066-2020-21-3-364-376. EDN YFLDNC.

3. Certificate of state registration of the computer program No. 2020617718 Russian Federation. Calculation of the axial gas turbine stage: No. 2020616646: application 26.06.2020: publ. 10.07.2020 / V. V. Vyatkov, A.M. Toshchakov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov". EDN GMFNSZ.

4. Certificate of state registration of the computer program No. 2023663311 Russian Federation. Program for automatic generation of CAD/CAE models of uncooled axial compressor and gas turbine blades (BGen): No. 2023662080: application 10.06.2023: publ. 21.06.2023 / А. И. Грищенко. EDN WUSQZV.

5. Zhirona, E. S. Development of methods for calculating and studying the temperature state of gas turbine blades / E. S. Zhirona, S. V. Fefelova, A. F. Ibatullina // Innovations. The science. Education. 2021. No. 48. pp. 1448-1453. EDN PZJPZD.

© Панасенко В. Ю., 2023

УДК 621.318.38

**ПРОРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, НАПЫЛЕНИЯ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕПЕСТКОВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ  
ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ\***

В. С. Пелевин\*, А. А. Алексенцев, А. Д. Блинов

Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34  
\*Email: Pelevin\_01@list.ru

*В данной работе была проработана целесообразность применения лепесткового газодинамического подшипника в малоразмерном газотурбинном двигателе, что позволит увеличить ресурс и надежность беспилотных летательных аппаратов и легкой авиации, использующей подобные двигатели. Определена конструкция и варианты напыления антифрикционного покрытия для эффективной работы подшипника. Для модернизированной компоновки и конструктивно-силовой схемы двигателя-прототипа, и его рабочих параметров, выбрана геометрия элементов подшипника и определена его несущая способность при 40000 об/мин.*

*Ключевые слова: малоразмерный газотурбинный двигатель, беспилотный летательный аппарат, радиальный газодинамический подшипник, несущая способность.*

**STUDYING THE DESIGN, SPRAYING AND FEASIBILITY OF USING GAS  
FOIL BEARING FOR A SMALL-SIZE GAS TURBINE ENGINE**

V. S. Pelevin\*, A. A. Aleksentsev, A. D. Blinov

Samara National Research University  
34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*Email: Pelevin\_01@list.ru

*In this work, the feasibility of using a gas-dynamic foil bearing in a small-sized gas turbine engine was studied, which will increase the service life and reliability of unmanned aerial vehicles and light aircraft using such engines. The design and options for spraying an antifriction coating for efficient operation of the bearing have been determined. For the modernized layout and structural-power circuit of the prototype engine, and its operating parameters, the geometry of the bearing elements was selected and its load-bearing capacity at 40,000 rpm was determined.*

*Keywords: small-sized gas turbine engine, unmanned aerial vehicle, radial gas foil bearing, bearing capacity.*

Эффективность современных беспилотных летающих аппаратов (БПЛА) в значительной степени определяется характеристиками силовой установки, в основе которой используются короткоресурсные малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД). Повышение требований к надежности и эффективности силовых установок, применяемых в БПЛА многофункционального назначения и легкой авиации, обуславливает необходимость поиска новых инженерных решений и научных задач или адаптации наработок из смежных сфер [1]. Основными тенденциями для подобных МГТД являются улучшение удельных параметров, повышение надежности и ресурса газотурбинных силовых установок за счет модернизации конструкции, применения новых материалов и современных технологий [2]. Одним из возможных путей соответствия заданным тенденциям по модернизации, при обеспече-

---

\* Работа выполнена по проекту FSSS-2022-0019, реализуемого в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок», результат «Созданы новые лаборатории, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей».

нии требований по габаритам и надежности, установки является замена на “сухую” опору, позволяющую исключить систему смазки и снизить до 30% массы силовой установки.

В данной работе была проработана конструкция газодинамического лепесткового подшипника (ЛГДП) для задней опоры МГТД, разработана аналитическая модель и проверена с учетом существующих экспериментальных данных, определены оптимальные типы антифрикционных покрытий и оценена экономическая целесообразность внедрения данного типа подшипников в конструкцию малоразмерных авиационных двигателей.

В качестве двигателя-прототипа использовался микро-ГТД с тягой 10 кгс. Данный двигатель обладает типовой конструкцией для данного класса тяг: центробежный компрессор, кольцевая камера сгорания с испарительными трубками и одноступенчатая осевая турбина с выходным устройством. При проектировании ЛГДП были разработаны объемные виртуальные модели при помощи изученных методов и наработок, изложенных в [3,4].

### Библиографические ссылки

1. Осипов, И. В. Разработка малоразмерных ГТД различного типа на базе унифицированного газогенератора / И. В. Осипов, В. С. Ломазов // *Авиационные двигатели*. 2019. № 4(5). С. 11-18
2. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник [Текст]. В 3 кн. Кн. 3. Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / под общ. ред. В.В. Кулагина. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.
3. Heshmat H., Walowit J. A., and Pinkus O., 1983, Analysis of Gas-Lubricated Foil Journal Bearings, *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 647-655.
4. San Andrés, Luis and Kim, Taeho, 2010, Thermohydrodynamic Analysis of Bump Type Gas Foil Bearings: A~Model Anchored to Test Data. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 132. DOI: 10.1115/1.3159386.

### References

1. Osipov, I. V. Development of small-sized gas turbine engines of various types based on unified gas generator / I. V. Osipov, V. S. Lomazov // *Aviation engine*, 2019.vol.4.p.p. 11-18 p.
2. Kulagin V.V. Aviation engines and power-plants theory, calculations and design. Manual. Primary problems. First level of designing, gas dynamic development, special characteristics and aviation engines conversion. M.: Mechanical engineering, 2005. vol.3. p.p. 12-34 p.
3. Heshmat H., Walowit J. A., and Pinkus O., 1983, Analysis of Gas-Lubricated Foil Journal Bearings, *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 647-655.
4. San Andrés, Luis and Kim, Taeho, 2010, Thermohydrodynamic Analysis of Bump Type Gas Foil Bearings: A~Model Anchored to Test Data. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 132. DOI: 10.1115/1.3159386.

© Пелевин В. С., Алексенцев А. А., Блинов А. Д., 2023

УДК 629.7.03

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХТАКТНЫХ ТРЕХЦИЛИНДРОВЫХ РАДИАЛЬНЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВС ДЛЯ БПЛА

М. А. Рутковская<sup>1</sup>, В. О. Рутковский<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Делмот»  
Российская Федерация, 660077, г. Красноярск, Авиаторов 1  
\*e-mail: jbiplane@gmail.com

*Предлагается применение трехцилиндровых радиальных двухтактных поршневых двигателей внутреннего сгорания в качестве силовой установки беспилотного летательного аппарата. Аналогичный двигатель ранее выпускался для немецких мотопланеров. Усовершенствование данного типа двигателей возможно за счет установки дополнительного балансировочного вала, вращающегося с удвоенной скоростью. В результате можно полностью исключить силы инерции первого и второго порядков.*

*Ключевые слова: кривошипно-шатунный механизм, радиальная звезда, двухтактный двигатель, уровень вибраций.*

## PROSPECTS FOR USE OF TWO-STAGE THREE-CYLINDER RADIAL PISTON ENGINES FOR UAV

M. A. Rutkovskaya<sup>1</sup>, V. O. Rutkovskiy<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
<sup>2</sup> DELMOT LLC

1, Aviatorov str., Krasnoyarsk, 660077, Russian Federation  
\*e-mail: jbiplane@gmail.com

*Proposed use of three-cylinder radial two-stroke piston internal combustion engines as UAV power plant. A similar engine was previously produced for German motor gliders. Improvement of this type of motors is possible due to the installation of an additional balancing shaft rotating at twice the speed. As a result, the inertia forces of the first and second orders can be completely eliminated.*

*Keywords: crank mechanism, radial star, two-stroke, engine, level of vibration.*

В настоящее время для беспилотных летательных аппаратов применяются три основные компоненты двигателей внутреннего сгорания: одноцилиндровые, двухцилиндровые [1, 2] и роторно-поршневые «ванкели». Двигатель является основным источником вибрации БПЛА. Вибрация двигателей обусловлена силами инерции движущихся масс и неравномерностью вращения выходного вала под действием газодинамических сил. Двигатели типа «ванкель» являются хорошо уравновешенными, так как отсутствуют возвратно-поступательные движения.

Самыми уравновешенными, из упомянутых выше ДВС, являются «ванкели», но они имеют повышенный расход топлива, низкий ресурс и высокую цену. В качестве альтернативы предлагается трехцилиндровая радиальная звезда с цилиндрами расположенными равномерно под 120 градусов друг относительно друга, показанная на рис. 1.

Все нижние головки трех шатунов находятся на одной оси. Для удобства обозначим оси цилиндров OX, OY и OZ. Массы всех подвижных деталей и длины шатунов одинаковы. На рис. 1 коленвал показан в положении, когда поршень X находится в верхней мертвой точке.

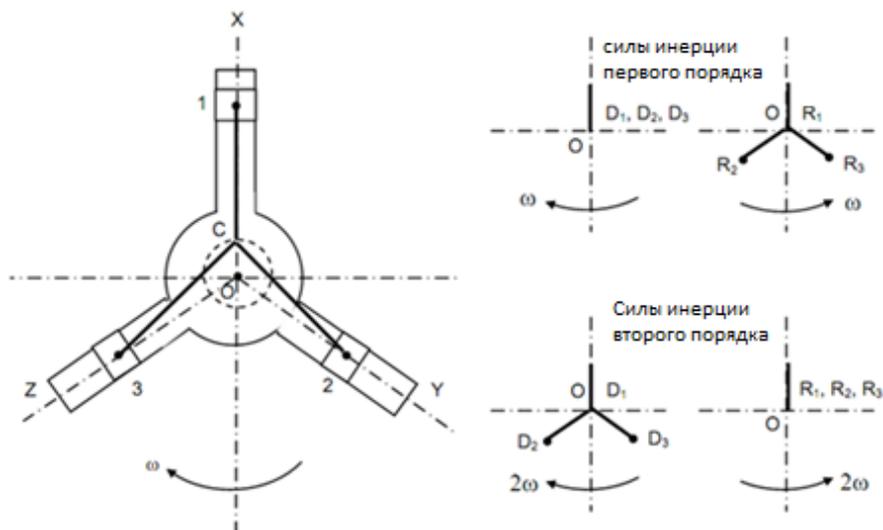


Рис. 1. Схема движущихся масс трехцилиндрового радиального поршневого ДВС

Несбалансированные силы инерции первого порядка всех деталей в направлении OX составят

$$F_p = 3 m \omega^2 r, \tag{1}$$

где  $m$  – масса комплекта поршня и присоединенной массы шатуна,  $r$  – радиус кривошипа,  $\omega$  – частота вращения в рад/сек.

Несбалансированные силы инерции второго порядка в направлении OX

$$F_s = 3 m / 2 (2\omega)^2 (r / 4n). \tag{2}$$

Вектор  $F_s$  вращается в направлении противоположном направлению вращения коленвала с удвоенной частотой  $2\omega$ ,  $n$  представляет собой отношение длины шатуна к радиусу кривошипа.

Выпускавшийся ранее в Германии двигатель для мотопланеров Koenig SC430 имел радиус кривошипа 0.02м и длину шатуна 0.073м. Сборка механизма Koenig SC430 была смоделирована в системе автоматизированного проектирования SolidWorks (рис. 2). Это позволило определить вес поршня с присоединенными массами, который равен 0.24кг. Рабочая частота вращения Koenig SC430 составляет 5000 об./мин или 523,6 рад/сек.

Сила инерции первого порядка (амплитуда) составит:

$$F_p = 3 \times 0.24 (523,6)^2 \times 0.02 = 3948 \text{ Н.}$$

Сила инерции второго порядка составит:

$$F_s = 3 \times 0.24 / 2 (2 \times 523,6)^2 \times (0.2 / 4 \times 3.65) = 5408 \text{ Н.}$$

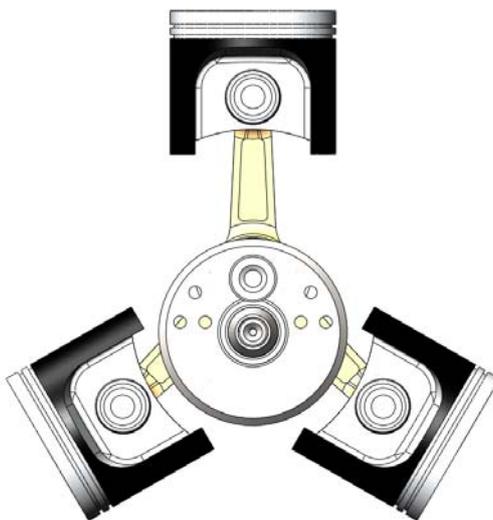


Рис. 2. Трехмерная модель механизма Koenig SC430

Силы инерции первого порядка могут быть полностью сбалансированы с помощью простого противовеса на коленвале. Силы инерции второго порядка можно полностью скомпенсировать при помощи балансирного вала, вращающегося с удвоенной скоростью.

Двигатель Koenig SC430 не имел подобного балансирного вала. При небольшом усовершенствовании трехцилиндровой звезды возможно получить двигатель, полностью сбалансированный по силам инерции первого и второго порядка. Для двигателя подобной конструкции требуется меньший стартовый момент при запуске, чем для двухцилиндрового оппозитного того же рабочего объема. Трехцилиндровая двухтактная звезда будет иметь равномерное вращение коленчатого вала, сравнимое с двигателем типа «ванкель».

#### **Библиографические ссылки**

1. Bell A. G. Two-Stroke Performance Tuning (2nd Edition), 28 Nov 1999 HAYNES MANUALS INC, Newbury Park, United States, 271 p.
2. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Сборник статей / Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана. Москва: Машгиз, 1954, 148 с.

#### **References**

1. Bell A. G. Two-Stroke Performance Tuning (2nd Edition), 28 Nov 1999 HAYNES MANUALS INC, Newbury Park, United States, 271 p.
2. Orlin A. S. Dvigateli vnutrennego sgorania [Internal combustion engines]: Sbornik statey / Mos-cowskoye vishee tehlichesкое uchilische im. N. E. Baumana. Moscow: Mashgiz, 1954, 148 p. (In Russ.)

© Рутковская М. А., Рутковский В. О., 2023

УДК 629.7.036.54

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ СОПЛА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ  
МАЛОЙ ТЯГИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ САД-ПАКЕТА CATIA V5**

Е. П. Талай\*, А. П. Бритков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: il20596@mail.ru

*В работе отражен способ моделирования различных профилей сопел жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) с применением средств автоматизированного проектирования пакета CATIA V5. Взаимодействие с пакетом CATIA V5 осуществляется при помощи разработанной программы, написанной на языке программирования Python. Программа по заданным данным из термодинамического расчета автоматически строит параметрическую модель контура камеры.*

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель малой тяги, сопло, Python.*

**MODELING OF THE NOZZLE PROFILE OF A LOW-THRUST LIQUID  
ROCKET ENGINE USING COMPUTER-AIDED DESIGN TOOLS  
OF THE CATIA V5 CAD PACKAGE**

E. P. Talay\*, A. P. Britkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: il20596@mail.com

*The work describes a method for modeling various nozzle profiles of low-thrust liquid rocket engines (LRELT) using computer-aided design tools of the CATIA V5 package. Interaction with the CATIA V5 package is carried out using a developed program written in the Python programming language. Based on the given data from the thermodynamic calculation, the program automatically builds a parametric model of the chamber contour.*

*Keywords: liquid-propellant rocket engine, nozzle, Python.*

Проектирование ЖРД является одной из самых сложных задач в производстве ракетно-космической техники. Цикл производства ЖРД требует очень больших затрат различных ресурсов, среди которых: исследовательские, материальные, производственные, трудовые затраты и др. [1]. Если говорить о разработке совершенно новых двигателей, то с точностью можно сказать, что из всего перечня затрачиваемых ресурсов на передний план выходят исследовательские ресурсы. Разработка нового двигателя подразумевает работу с совершенно новыми, ранее не использованными материалами, технологиями, принципиальными схемами и т. д.

Исследования в данной области соответственно занимают положительный период времени. Поэтому остро стоит вопрос о минимизации времени на введение новшеств при разработке новых ЖРД.

Примером одного из текущих исследований в двигателестроении является применение технологий аддитивной печати металлом для производства ЖРД и ЖРДМТ, в частности. Данная технология самостоятельно до конца не изучена как учеными, так и инженерами. На сегодняшний день технология также не адаптирована применительно к производству ЖРД. Существует ряд проблем, которые решаются инженерами таких как подбор материалов, режимов и скоростей печати, качество поверхности и др. Особенно сложным является выбор оптимальной геометрической формы камеры. Связано

это со специфическими требованиями технологического процесса печати металлом сложнопрофильных изделий.

В связи с этим возникают частые корректировки геометрии сопла. Традиционные методы формирования геометрии сопел ЖРД являются отработанными и вполне применимыми, но они не способны в короткие промежутки времени оперативно формировать необходимые геометрические параметры, которые бы были использованы для отработки технологии.

В качестве одного из способов ускорения процесса получения геометрической формы сопла нами предложена программа, которая написана на языке программирования Python [2] с использованием средств API CAD-пакета высокого уровня CATIA V5. Принцип работы программы заключается в том, что она с высокой скоростью в автоматическом режиме позволяет строить профиль сопла по данным, полученным из термодинамического расчета.

При запуске программы появляется окно рис. 1, где пользователю предложено ввести исходные параметры: диаметр камеры сгорания, диаметр критического сечения, диаметр среза сопла и др. После внесения данных требуется запустить расчет, а после дать команду «Построить».

Результат работы программы сопровождается диалоговым окном рис. 2 и выводится во внешний файл с расширением «CATPart» [3] с которым можно продолжать работу в CAD-пакете CATIA V5 рис. 3. В случае ошибки во время построения программа сообщит о ней пользователю также в диалоговом окне.

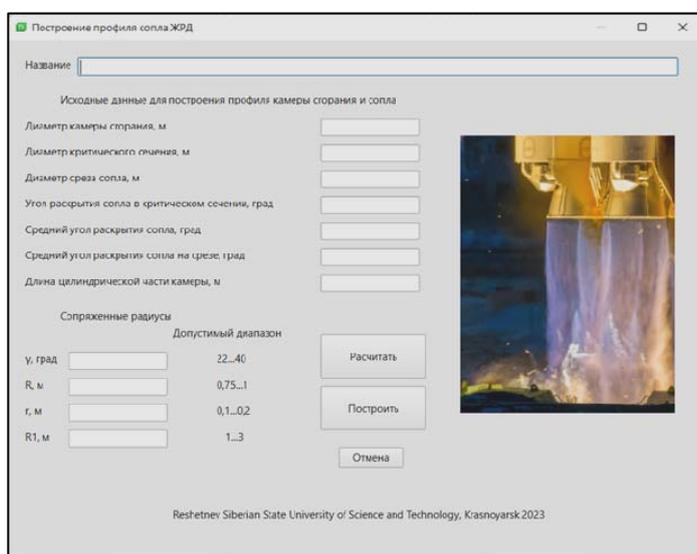


Рис. 1. Диалоговое окно программы

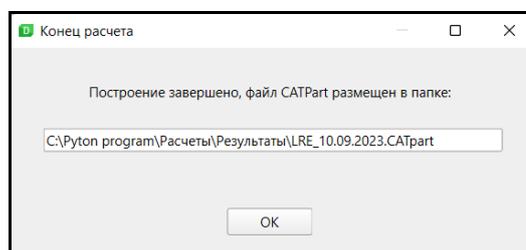


Рис. 2. Уведомление о завершении расчета в виде диалогового окна

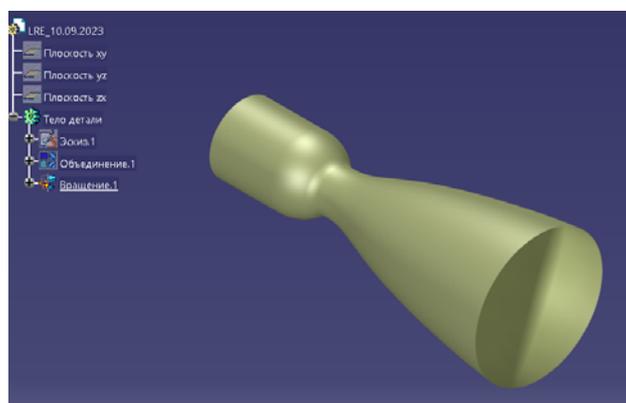


Рис. 3. Результат работы программы в CATIA V5

Программа создана для операционной системы Windows 7 и более поздних её версий. Работа с программой не требует специальных настроек. Для ее функционирования на компьютере должен быть предустановлен САD-пакет САTIA V5.

Полезность программы заключается в легкости использования, скорости формирования выходного файла с моделью камеры после расчета. Данную программу предлагается использовать в учебных целях по направлениям подготовки связанных с проектированием ЖРД.

### Библиографические ссылки

1. Гречух Л. И., Гречух И. Н. Жидкостные ракетные двигатели [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Минобрнауки России, Омский государственный технический университет. Омск: ОмГТУ, 2017. 140 с.: табл., граф., схем. Библиогр.: с. 135. ISBN 978-5-8149-2470-4. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493319> (дата обращения: 10.09.2023).

2. Буйначев, С. К. Основы программирования на языке Python: учебное пособие / С. К. Буйначев, Н. Ю. Боклаг. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 91, [1] с. ISBN 978-5-7996-1198-9.

3. Косенко И.И. Проектирование и 3D моделирование в средах САTIA V5, ANSYS и Dymola 7.3 / И.И. Косенко, Л.В. Кузнецова, А.В. Николаев. Москва: Инфра-М, 2019. 183 с. ISBN 978-5-16-012754-5. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/361552/reading> (дата обращения: 10.09.2023). Текст: электронный.

### References

1. Grechukh L.I., Grechukh I.N. Liquid Rocket Engines [Electronic resource]: textbook / Ministry of Education and Science of Russia, Omsk State Technical University. Omsk: OmSTU, 2017. 140 p.: tables, graphs, diagrams. Bibliography: p. 135. ISBN 978-5-8149-2470-4. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493319> (accessed: September 10, 2023).

2. Buynachev, S.K. Fundamentals of Programming in Python: textbook / S.K. Buynachev, N.Yu. Boklag. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2014. 91, [1] p. ISBN 978-5-7996-1198-9.

3. Kosenko I.I. Design and 3D Modeling in CATIA V5, ANSYS, and Dymola 7.3 Environments / I.I. Kosenko, L.V. Kuznetsova, A.V. Nikolaev. Moscow: Infra-M, 2019. 183 p. ISBN 978-5-16-012754-5. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/361552/reading> (accessed: September 10, 2023). Text: electronic.

© Талай Е. П., Бритков А. П. 2023

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ В ПОЛОСТЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ТНА

В. А. Татычев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: tatychev01@mail.ru

*Рассмотрены работы по исследованию течения в полостях элементов турбонасосного агрегата. Полученная информация необходима для выполнения численного моделирования течения.*

*Ключевые слова: ТНА, вязкое течение, численное моделирование, гидродинамика.*

## THE USE OF THE NUMERICAL MODELING METHOD FOR SOLVING HYDRODYNAMIC PROBLEMS IN THE CAVITIES OF TNA ELEMENTS

V. A. Tatychev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: tatychev01@mail.ru

*The work on the study of the flow in the cavities of the elements of the turbopump unit is considered. The information obtained is necessary to perform numerical simulation of the flow.*

*Keywords: turbopump unit, viscous flow, numerical simulation, liquid rocket engine.*

В современных ЖРД для подачи топлива широко применяется система с турбонасосным агрегатом, который в свою очередь состоит из насосов, которые подают компоненты топлива с заданными параметрами, и привода насосов – газовой турбины.

ТНА является составной частью двигательной установки, в связи с этим требования, которые предъявляются к турбонасосному агрегату формулируются исходя из задач, которые решает ДУ. Кроме того, к ТНА предъявляется ряд обязательных требований:

- обеспечение на всех режимах работы двигателя подачи компонентов топлива требуемого расхода и давления при высокой степени надежности с приемлемым КПД всего агрегата.
- обеспечение минимальных размеров и массы всей ДУ за счет наименьших габаритных размеров и массы самого ТНА [1].

При проектировании турбонасосного агрегата появляется необходимость в проверке правильности принятых конструкторских решений. Численное моделирование течения в полостях элементов ТНА позволяет еще на этапе проектирования произвести испытание, и определить необходимые характеристики.

Данная работа является актуальной, так как численное моделирование позволяет рассмотреть большее количество вариантов конструкции за меньшее время. Для выполнения численного моделирования необходимо изучить работы по исследованию течения жидкости в элементах ТНА.

В работе [2] рассматриваются динамически нестабилизированные течения, которые характерны для элементов проточных частей турбонасосных агрегатов ЖРД. В работе на основе учета особенностей профилей распределения скорости в динамическом пограничном слое нестабилизированных течений получены выражения для определения его толщины в зависимости от координат. Результаты работы можно использовать при выполнении работы по численному моделированию течения.

В работе [3] решается задача корректного определения энергетических характеристик в проточных частях ЖРД. Авторы рассматривают законы и зависимости, которые характерны для конкретных условий течений. Энергетические характеристики потока зависят от характера течения. В ходе течения, характер может меняться и становиться ламинарным или турбулентным. В работе описано, какие зависимости и законы необходимо использовать при конкретных условиях.

В работе [4] разработана методика, алгоритмы и программа расчета параметром течения с теплоотдачей в стенку. Такое течение характерно для полостей элементов турбонасосного агрегата. Алгоритм расчета течения реализован в программное обеспечение, которое позволяет рассчитывать полости течения различной формы. Авторы подтверждают достоверность методики расчета сходимостью теоретических и экспериментальных и теоретических данных исследуемых участков.

В работе [5] представлен метод расчета пространственного пограничного слоя. На основе результатов теоретических исследований был разработан алгоритм и программа расчета, позволяющая рассчитывать локальные значения напора по длине межлопаточного канала. Достоверность работы подтверждается сравнением результатов численной и экспериментальной визуализации, которые показывают сходную картину течения.

Таким образом, все рассмотренные работы помогают учесть факторы, которые необходимо учитывать при численном моделировании течения в полостях элементов турбонасосного агрегата ЖРД. Численное моделирование позволяет сократить время на разработку конструкции элементов, а также определить наиболее оптимальный вариант исполнения.

### Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки»/ Гахун Г.Г., Баулин В.И., Володин В.А. и др. Под общ. Ред. Г.Г. Гахуна. М.: машиностроение, 1989. 424с.

2. Зуев, А. А. Участки динамически нестабилизированных течений в характерных каналах проточных частей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Зуев, А. А. Арнольд, В. П. Назаров // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 3. С. 167-185.

3. Жуйков, Д. А. К расчету потерь в проточных частях агрегатов подачи жидкостных ракетных двигателей / Д. А. Жуйков, А. А. Зуев, М. И. Толстопятков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2020. № 6(135). С. 21-34.

4. Программный комплекс расчёта каналов с криволинейными линиями тока при поперечном градиенте давления / А. А. Неизвестных, С. А. Жежера, Т. В. Тютюнников [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 13–17 апреля 2020 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2020. С. 169-171.

5. Черненко, В. В. Модель течения в рабочем колесе центробежного насоса / В. В. Черненко, Д. В. Черненко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т., Красноярск, 12–16 апреля 2021 года. Том 1. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. С. 350-352.

### References

1. Construction and design of liquid rocket engines: Textbook for university students in the specialty "Aircraft engines and power plants"/ Gakhun G.G., Baulin V.I., Volodin V.A., etc. Under the general Ed. of G.G. Gahun. M.: mechanical engineering, 1989. 424p.

2. Zuev, A. A. Sites of dynamically unstabilized flows in characteristic channels of flow parts of turbopump units of liquid rocket engines / A. A. Zuev, A. A. Arngold, V. P. Nazarov // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2020. Vol. 27, No. 3. P. 167-185.

3. Zhuikov, D. A. To the calculation of losses in the flow parts of liquid rocket engine supply units / D. A. Zhuikov, A. A. Zuev, M. I. Tolstopyatov // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering series. 2020. № 6(135). P. 21-34.

4. A software package for calculating channels with curved current lines at a transverse pressure gradient / A. A. Neizvestnykh, S. A. Zhezhera, T. V. Tyutyunnikov [et al.] // Actual problems of aviation and cosmonautics: A collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference dedicated to the Day of Cosmonautics. In 3 volumes, Krasnoyarsk, April 13-17, 2020 / Under the general editorship of Y.Y. Loginov. Volume 1. Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2020. P. 169-171.

5. Chernenko, V. V. Flow model in the impeller of a centrifugal pump / V. V. Chernenko, D. V. Chernenko // Actual problems of aviation and cosmonautics : Collection of materials of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to the Day of Cosmonautics: in 3 volumes, Krasnoyarsk, April 12-16, 2021. Volume 1. Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2021. P. 350-352.

© Татычев В. А., 2023

УДК 621.45

## ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА МЕТАН-КИСЛОРОДЕ ДЛЯ СВЕРХЛЁГКОГО РАКЕТОНОСИТЕЛЯ

А. А. Чижов

Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34  
Email: art@chizhov-top.ru

*В работе была проработана целесообразность применения жидкостного ракетного двигателя со штыревым соплом смешанного расширения для сверхлёгкого ракетносителя, что позволит увеличить массу полезной нагрузки. Определена эффективность использования такого двигателя вместо двигателя с соплом Лаваля. Для принятой секционной компоновки двигателя, и его рабочих параметров, выбрана геометрия центрального тела штыревого сопла для расчётной высоты полёта 10 км.*

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, двигательная установка, метан, штыревое сопло, клиновоздушное сопло, внешнее расширение.*

## METHANE-OXYGEN PROPULSION ENGINE FOR ULTRALIGHT LAUNCH VEHICLE

A. A. Chizhov

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
Email: art@chizhov-top.ru

*The expediency of using a liquid rocket engine with a mixed expansion pin nozzle for an ultralight launch vehicle was worked out, which will increase the payload mass. The efficiency of using such an engine instead of an engine with a Laval nozzle is determined. For the adopted sectional layout of the engine and its operating parameters, the geometry of the central body of the pin nozzle for an estimated flight altitude of 10 km was selected.*

*Keywords: liquid rocket engine, propulsion system, methane, pin nozzle, wedge-air nozzle, external expansion.*

Эффективность использования жидкостных ракетных двигателей с соплом Лаваля почти достигла своего максимума. Дальнейшее улучшение возможно оптимизацией конструкции отдельных двигателей на небольшие значения. Очевидным считается решение использования новых принципов в конструкции, одним из них является использования штыревого сопла [1]. В отличие от сопла Лаваля, работающего почти всё время на режиме недорасширения или перерасширения, штыревое сопло не имеет аналогичного участка перерасширения, а значит работает с большей эффективностью [2].

Расход топлива в таких соплах при работе по аналогичной программе полёта уменьшается на 15%, что значительно влияет на тактико-технические характеристики ракеты [3]. Для принятия решения об использовании конкретного типа двигателя используются значения массы полезной нагрузки и характеристической скорости ракеты.

Метан рассматривается как перспективное топливо, которое уже активно осваивают частные космические компании и рассматривают государственные [4].

Сопло спроектировано под расчётную высоту 10 км полёта. Для рассматриваемого типа ракетносителя это даёт около 60 секунд работы в более оптимальном режиме. Конструкция камеры выбрана секционной с соплом предварительного расширения для простоты проектировочной работы. Сегментирование сопла вносит дополнительные потери в тяге. Для оценки эффективности работы на разных высотах и потерь тяги проведено численное моделирование для разных высот в диапазоне 0 –

10 км. Выше расчётной высоты оценка проведена только для точки 30 км, так как работа не будет значительно отличаться от сопла Лавалья. Исследован вклад донного давления, эжекции воздуха в межкамерном пространстве в тягу [5].

### **Список литературы**

1. В. К. Чванов, П. С. Левочкин, Б. В. Лопатин [и др.]. Проекты авторегулируемых по высоте полета двигательных установок со штыревыми соплами перспективных ракет-носителей // Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. 2017. № 34. С. 63-80. EDN YLTEUX.
2. Ваулин С.Д., Хажиахметов К.И. Жидкостные ракетные двигатели с центральным телом: состояние и перспективы // Известия вузов. Машиностроение. 2021. №10 (739).
3. Ключников Валерий Юрьевич Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // ВКС. 2019. №3 (100).
4. Мирошкин В. В. Повышение эффективности системы подачи топлива кислороднометанового ЖРД с дожиганием восстановительного генераторного газа: автореферат дис. канд. техн. наук. М., 2005. 18 с.
5. Бачурин Александр Борисович, Русак Анатолий Михайлови, Целищев Владимир Александрович Экспериментальные и теоретические исследования особенностей течения в регулируемых соплах с центральным телом // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2010. №5 (40).

### **References**

1. V. K. Chvanov, P. S. Levochkin, B. V. Lopatin [et al.]. Projects of self-regulating propulsion systems with pin nozzles of promising launch vehicles // Proceedings of NPO Energomash named after academician V.P. Glushko. 2017. No. 34. pp. 63-80. EDN YLTEUX.
2. Vaulin S.D., Khazhiakhmetov K.I. Liquid rocket engines with a central body: state and prospects // Izvestiya vuzov. Mechanical engineering. 2021. No. 10 (739).
3. Klyushnikov Valery Yuryevich Ultralight launch vehicles: niche in the market of launch services and promising projects // VKS. 2019. No. 3 (100).
4. Miroshkin V. V. Improving the efficiency of the fuel supply system of oxygen-methane liquid propellant with afterburning of reducing generator gas: abstract dis. candidate of Technical Sciences. M., 2005. 18 p.
5. Bachurin Alexander Borisovich, Rusak Anatoly Mikhailov, Tselishchev Vladimir Alexandrovich Experimental and theoretical studies of flow characteristics in controlled nozzles with a central body // Vestnik UGATU = Vestnik UGATU. 2010. No. 5 (40).

© Чижов А. А., 2023

УДК 621.45.054

## ПЕРСПЕКТИВЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ

В. И. Шестерня\*, Г. А. Кирюшкин, К. Ф. Голиковская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: shesternyavova@yandex.ru

*В данной статье рассмотрены методы управления вектором тяги РН и РД.*

*Ключевые слова: управление вектором тяги, камера, сопло.*

## PROSPECTS OF THRUST VECTOR CONTROL

V. I. Shesternya\*, G. A. Kiryushkin, K. F. Golikovskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: shesternyavova@yandex.ru

*This article discusses methods for controlling the thrust vector of the LV and RE.*

*Keywords: Thrust vector control, camera, nozzle.*

Управление вектором тяги (УВТ) жидкостных ракетных двигателей является критическим аспектом управления полетом ракеты. Необходимость УВТ вызвана требованиями к маневренности летательного аппарата: для регулирования направления и скорости полета ракеты [1].

В настоящее время для управления вектором тяги применяются различные способы [1-2]:

- а) Поворот камеры в карданном подвесе;
- б) Применение поворотных выхлопных патрубков (газ из ТНА);
- в) Поворот сопла;
- г) Применение газовых рулей;
- д) Применение кольцевого дефлектора газовой струи;
- е) Впрыск рабочего тела;
- ж) Применение поворотных управляющих сопел

Способы (а-д, ж) имеют ряд недостатков – они требуют наличия гидравлических, пневматических или электрических приводов, помимо этого, для использования рулевых двигателей требуется специальная система подачи [3]. Последние два способа (е, ж) обеспечивают управление вектором тяги за счет изменения расхода вспомогательного рабочего тела.

Несмотря на недостатки, УВТ ракет-носителей (РН) «Энергия», «Atlas-III», «Atlas-V» обеспечивается маршевыми ЖРД (РД171, РД180) посредством качания их камер цифровыми электрогидравлическими следящими рулевыми приводами (РП) [4].

Недостаток РП заключается в том, что их наличие увеличивает общую массу агрегата, также их конструкция должна соответствовать ряду требований для обеспечения надежности летательного аппарата.

В работах [4-5] изложены конструкторские предложения по модернизации РП для УВТ. Данные решения предназначены для упрощения конструкции, сокращения массы и, следовательно, снижения стоимости.

Помимо этого, начинают использоваться совершенно новые способы управления вектором тяги, например в двигателе С5.92 спроектирована система плоскопараллельного перемещения камеры в двух плоскостях [3].

Таким образом, перспективы управления вектором тяги жидкостных ракетных двигателей включают разработку более точных и эффективных систем управления, а также использование более ин-

новационных технологий. Будущие достижения в этой области могут улучшить надежность и безопасность ракетных двигателей.

### Библиографические ссылки

1. Тищенко К. О., Брыков Н. А., Беляева А. С. Управление вектором тяги реактивного двигателя с помощью внутрисоплового интерцептора // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции. Самара. 2021. С. 177-178.
2. Тимнат И. М. Ракетные двигатели на химическом топливе. М. : Мир, 1990. 294 с.
3. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 488 с.
4. Белицкий Д. С. Использование модернизированных рулевых приводов для управления вектором тяги ЖРД РД180 / Д. С. Белицкий, Д. И. Григоренко, С. В. Владимиров // Труды НПО Энергомаш. 2006. № 24. С. 140-150.
5. Разработка цифрового рулевого привода для управления вектором тяги мощных ЖРД / Б. М. Громыко, В. В. Кириллов, А. В. Макаров и др. // Труды НПО Энергомаш. 2006. № 24. С. 151-162.

### References

1. Tishchenko, K. O., Brykov N. A., Belyaeva A. S. [Control of the thrust vector of the jet engine using inner-nozzle interceptor]. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya* [Problems and prospects for the development of engine building]. Samara, 2021, P. 177-178 (In Russ.).
2. Timnat I. M. *Raketnye dvigateli na khimicheskom toplive* [Chemical fuel rocket engines]. Moscow, Mir Publ., 1990, 294 p.
3. Dobrovolskii M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid propellant rocket engines]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2005, 488 p.
4. Belitskii D. S., Grigorenko D. I., Vladimirov S. V. [Use of modernized steering actuators to control the thrust vector of the RD180 liquid propellant rocket engine]. *Trudy NPO Energomash*. 2006, No. 24, P. 140-150 (In Russ.).
5. Gromyko B. M., Kirillov V. V., Makarov A. V., Mikhalev I. A. [Development of a digital steering actuator to control the thrust vector of powerful liquid propellant rocket engines]. *Trudy NPO Energomash*. 2006, No. 24, P. 151-162 (In Russ.).

© Шестерня В. И., Кирюшкин Г. А., Голиковская К. Ф., 2023

УДК 536.246

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОХЛАЖДЕНИЯ РДМТ, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

В. И. Шестерня

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: shesternyavova@yandex.ru

*В данной работе представлены результаты нескольких расчетов охлаждения РДМТ, изготовленного по технологии 3D-печати, при различных массовых расходах охладителя.*

*Ключевые слова: РДМТ, SLM печать, метод Иевлева, метод критериальных зависимостей, численное моделирование.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF COOLING CALCULATION METHODS OF LTRE MANUFACTURED USING 3D-PRINTING TECHNOLOGY

V. I. Shesternya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shesternyavova@yandex.ru

*This article presents the results of several cooling calculations of LTRE manufactured using 3D-printing technology at various coolant mass flow rates.*

*Keywords: LTRE, SLM printing, Ievlev's method, the method of criteria dependencies numerical simulation.*

Охлаждение камер ракетных двигателей является одним из важнейших вопросов проектирования ЖРД. В процессе эксплуатации двигателя возникает высокая тепловая нагрузка, которая может сказаться на работе изделия, если температура огневой стенки превысит предельно допустимое значение [1]. Внедрение аддитивных технологий связано с рядом технических сложностей, обусловленных снижением характеристик материала [2], поэтому расчет охлаждения необходимо проводить с высокой точностью.

Существует несколько аналитических методов расчета конвективных тепловых потоков, один из которых расчет по критериальным зависимостям, а второй метод Иевлева. При методе Иевлева используется система уравнений, с помощью которой определяется значение конвективного удельного теплового потока  $q_k$ .

При другом методе применяется критериальная формула Гухмана-Илюхина, с помощью которой находится коэффициент теплоотдачи от газа к стенке  $\alpha_g$ , а после значение  $q_k$  согласно зависимости Ньютона-Рихмана [3]. Более подробный порядок расчета конвективных тепловых потоков изложен в работах [3-5].

В данной работе проведен расчет охлаждения с помощью двух этих методов, а также для точности результатов проведено численное моделирование данного процесса, так как обычно для ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) не предусмотрено охлаждение. На рисунке 1 представлено распределение температуры при различных граничных условиях. В первом исследовании массовый расход продуктов сгорания (ПС) на входе и термодинамические параметры следующие:  $\dot{m} = 0,06755$  кг/с,  $p_k = 1$  МПа,  $T = 1000$  К.

Во втором исследовании создана имитация пристеночного слоя. Граничные условия следующие:  $\dot{m}_1 = 0.047285$  кг/с,  $\dot{m}_2 = 0.020265$  кг/с,  $p_{k1,2} = 1$  МПа,  $T_1 = 2367$  К,  $T_2 = 1000$  К. Давление на выходе в обоих исследованиях  $p_a = 0,00085$  МПа. Массовый расход охладителя (воды) на входе в коллектор

варьировался от 50 до 75 г/с,  $T_{\text{охл}} = 298 \text{ К}$ . Давление на выходе из коллектора такое же, как и на срезе сопла. Расчетная сетка состоит из 4668637 ячеек.

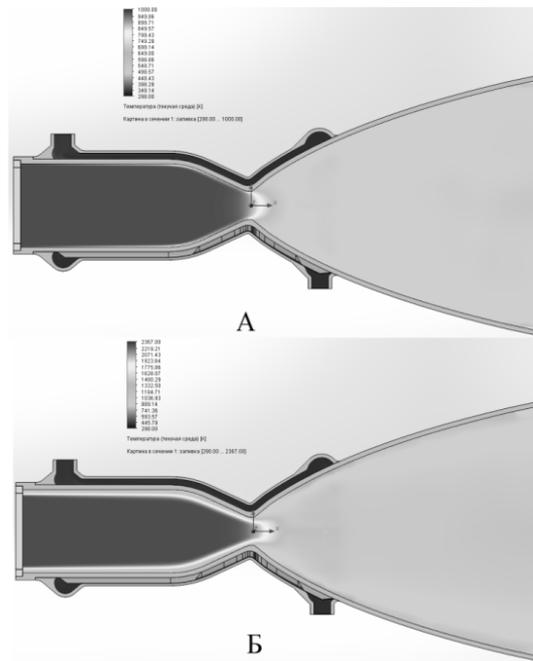


Рис. 1. Температура текучей среды:  
А – без пристеночного слоя, Б – с пристеночным слоем

Камера разбита на 24 участка, искомым параметром стала температура стенки со стороны ПС и охладителя с 5 по 23 участок (входной и выходной коллектор). На рис. 2 представлены результаты расчетов в Mathcad и численного моделирования в пакете Solidworks Flow Simulation.

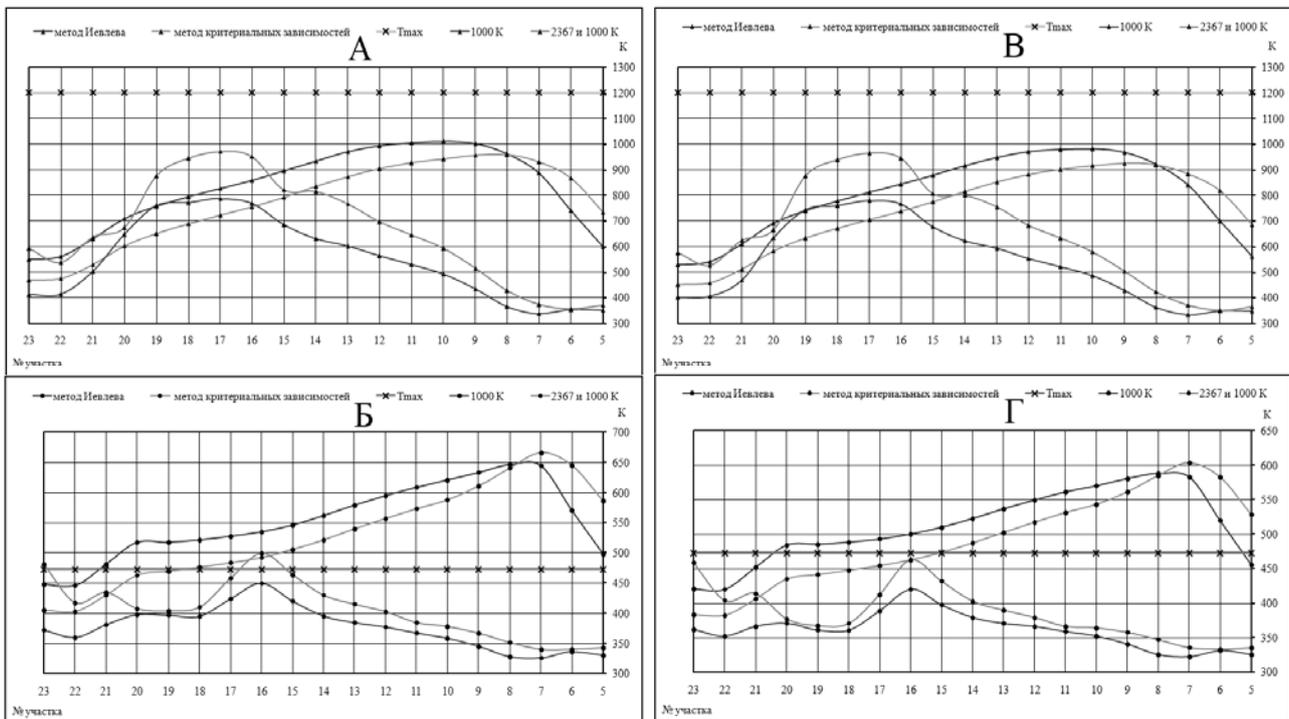


Рис. 2. Температура стенки со стороны ПС и жидкости при  $\dot{m}_{\text{охл}} = 50 \text{ г/с}$  (А,Б) и  $\dot{m}_{\text{охл}} = 75 \text{ г/с}$  (Б,Г)

В итоге, значения температур при расчете различными аналитическими методами в Mathcad немного отличаются друг от друга за счет разных конвективных тепловых потоков. Результаты численного моделирования показали другой результат, необходимы дополнительные исследования. Опираясь на численное моделирование, оптимальным массовым расходом охладителя можно принять 75 г/с, в данном случае температуры стенки со стороны ПС и охладителя не превышают предельно допустимые значения.

### Библиографические ссылки

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 488 с.
2. Анализ теплопрочностного состояния цилиндрической камеры сгорания, изготовленной с использованием аддитивных технологий / Е. С. Ушакова, К. Ю. Арефьев, С. В. Заикин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020, № 2 (719). С. 68-79.
3. Александренков В. П. Расчет наружного проточного охлаждения камеры ЖРД. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2012. 74 с.
4. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / Е. В. Лебединский, Г. П. Калмыков, С. В. Мосолов [и др.]. М. : Машиностроение, 2008. 512 с
5. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1989. 464 с.

### References

1. Dobrovolskii M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid propellant rocket engines]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2005, 488 p.
2. Ushakova E. S., Arefyev K. Yu., Zaikin S. V., Polyanskiy A.R., Isakov V. V. [A thermal strength state analysis of a cylindrical combustion chamber manufactured using additive technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2020, No. 2 (719), P. 68-79 (In Russ.).
3. Aleksandrenkov V. P. *Raschet naruzhnogo protochnogo okhlazhdeniya kamery ZhRD* [Calculation of external flow cooling of the LRE chamber]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2012, 74 p.
4. Lebedinskiy E. V., Kalmykov G. P., Mosolov S. V. et al. *Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ikh modelirovanie* [Working processes in a liquid propellant rocket engine and their modeling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 512 p.
5. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. *Teoriya raketnykh dvigateley* [Rocket engine theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 464 p.

© Шестерня В. И., 2023

УДК 004.94

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ SLM-ПЕЧАТИ

В. И. Шестерня

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: shesternyavova@yandex.ru

*В данной работе представлена разработка математической модели камеры РДМТ с охлаждением, которая будет изготавливаться методом SLM-печати, для исследований с использованием численного моделирования в пакете Solidworks Flow Simulation.*

*Ключевые слова: РДМТ, SLM-печать, численное моделирование, математическая модель.*

## NUMERICAL SIMULATION OF A ROCKET ENGINE CHAMBER COOLING SYSTEM FOR MANUFACTURING BY SLM-PRINTING METHOD

V. I. Shesternya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shesternyavova@yandex.ru

*This article presents the development of a mathematical model of cooled LTRE chamber, which will be manufactured by SLM-printing, for research using numerical simulation in the Solidworks Flow Simulation package.*

*Keywords: LTRE, SLM-printing, numerical simulation, mathematical model.*

При проектировании ракетных двигателей одним из ключевых аспектов является обеспечение эффективной системы охлаждения. Расчет охлаждения необходимо проводить с высокой точностью [1-2], так как во время работы двигателя происходит интенсивный нагрев, который может привести к прогоранию.

Преимущество численного моделирования заключается в сокращении ресурсных затрат путем создания математической модели объекта исследования. В данной работе разработка трехмерной математической модели основывается на методах, описанных в источниках [3-4]. С использованием результатов термодинамического расчета и аналитических расчетов охлаждения в программе Mathcad, спроектирована твердотельная модель камеры ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) [5] с входным коллектором в области критического сечения и меридиональными каналами.

На конечном этапе планируется создание камеры РДМТ с охлаждением, используя метод селективного лазерного плавления из металлического порошка хромоникелевого сплава ПР-08ХН53МБТЮ (Inconel 718), со следующими геометрическими размерами:

Диаметр камеры сгорания (КС)  $D_k = 35$  мм;

Диаметр критического сечения  $D = 11,7$  мм;

Диаметр среза сопла  $D_a = 106$  мм

Сопряженные радиусы  $R_1 = 35$  мм;  $R = 8,8$  мм;  $r = 1,2$  мм;

Длина цилиндрической части КС  $L_{ц} = 62$  мм;

Длина сверхзвуковой части сопла  $L_c = 122$  мм;

Угол входа  $\gamma = 25^\circ$ ;

Угол раскрытия сопла на срезе  $\alpha_a = 12^\circ$ ;

Высота тракта охлаждения  $h_r = 2,5$  мм;

Длина тракта охлаждения  $L_{т.о} = 117$  мм;

Толщина огневой стенки  $\delta_{st} = 2$  мм;

- Толщина ребра  $\delta_r = 1$  мм;
- Толщина наружной стенки  $\delta_{st.n} = 1$  мм;
- Угол наклона ребра к образующей  $\beta = 0^\circ$ ;
- Минимальный шаг оребрения  $t_{N.min} = 2,52$  мм;
- Максимальный шаг оребрения  $t_{N.max} = 4,66$  мм.

Для течения жидкости в охлаждающем тракте смоделированы подводы в коллекторах. Геометрические параметры задавались произвольно, в будущем планируется их оптимизация для SLM-печати.

В пакете Solidworks Flow Simulation создан проект расчета. Так как задача является внутренней, созданы заглушки в местах отверстий. Использованы следующие физические модели: теплопроводность в твердых телах и радиационный теплообмен. В качестве текучей среды выбраны продукты сгорания (ПС) и вода, тип течения – ламинарное и турбулентное. Материал – инконель 718. Условия на стенках заданы следующие: тепловое условие по внешней стенке – адиабатическая стенка, радиационные свойства поверхностей – инконель, шероховатость – 15 мкм. На рис. 1 представлены свойства текучей среды и материала, заданные пользователем.

Свойство	Значение	Свойство	Значение
Имя	Продукты сгорания (кислород + метан)	Имя	Инконель
Комментарии		Комментарии	
Показатель адиабаты (Ср/Сv)	1.2	Тип поверхности радиационного теплообмена	Стенка
Молекулярная масса	0.01501 kg/mol	Отражение	Диффузное
Динамическая вязкость	6.4e-05 Pa*s	<input type="checkbox"/> Степень черноты	Задание для теплового и солнечного излучения
Удельная теплоемкость (Ср)	(Таблица)	<input type="checkbox"/> Степень черноты	0.8
Коэффициент теплопроводности	0.1642 W/(m*K)	<input type="checkbox"/> Коэффициент поглощения солнечного излучения	0.8

Свойство	Значение
Имя	Инконель 718
Комментарии	
Плотность	8190 kg/m^3
Удельная теплоемкость	435 J/(kg*K)
Тип проводимости	Изотропная
Коэффициент теплопроводности	11.4 W/(m*K)
Электропроводность	Проводник
Удельное сопротивление	1.03e-06 Ohm*m
Радиационные свойства	<input type="checkbox"/>
Температура плавления	<input checked="" type="checkbox"/>
Температура	1300 K

Рис. 1. Свойства текучей среды и материала, заданные вручную

В качестве начальных условий заданы давление  $p = 0,00085$  МПа и температура  $T = 298$  К. Параметры турбулентности выбраны по умолчанию. Для течения воды в охлаждающем тракте создана подобласть течения. На рис. 2 представлены расчетная область и подобласть течения охладителя. Для точности результатов начальный уровень сетки равен 5, также созданы локальные сетки с большим уровнем дробления в области критического сечения камеры.

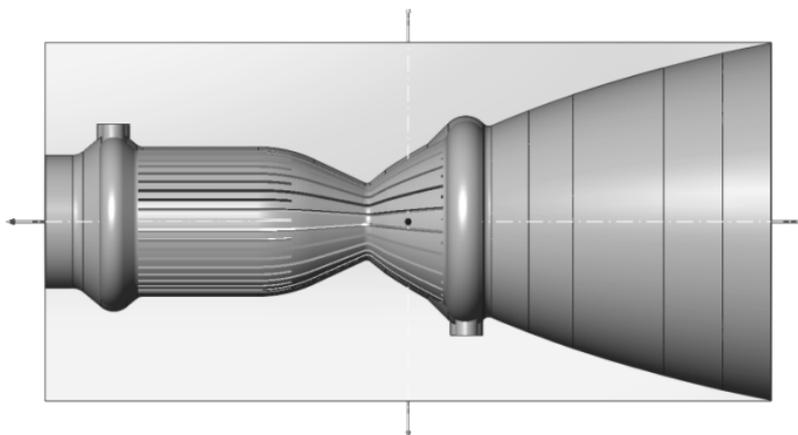


Рис. 2. Расчетная область и подобласть течения охладителя

Расчетная сетка содержит 4668637 ячеек. Для имитации пристеночного слоя заглушка в области цилиндрической части КС разделена на две части, на каждой из которых можно задать разные граничные условия. Граничные условия задаются следующие: давление на входе  $p = p_k = 1$  МПа, массовый расход продуктов сгорания на входе  $\dot{m}_{1,2} = 0,06755$  кг/с ( $T = 1000$  К), либо  $\dot{m}_1 = 0.047285$  кг/с ( $T = 2367$  К) и  $\dot{m}_2 = 0.020265$  кг/с ( $T = 1000$  К), давление на выходе  $p = p_a = 0,00085$  МПа. Массовый расход охладителя варьируется от 50 до 150 г/с, температура на входе и давление на выходе такие же, как и в начальных условиях.

Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована в дальнейших исследованиях, например в задаче сопряженного теплообмена и исследовании гидравлических потерь в тракте охлаждения.

### Библиографические ссылки

1. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1989. 464 с.
2. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 488 с.
3. Бабкина Л. А., Сорокин Д. В. Моделирование течения жидкости и газа в пакете SolidWorks Flow Simulation. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2012. 72 с.
4. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
5. Шестерня В. И., Алексеенко В. В., Кирюшкин Г. А. Проектирование 3D-модели камеры ЖРД малой тяги с охлаждающим трактом для SLM печати // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов IX международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. Красноярск, 2023. С. 250-252.

### References

1. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. Teoriya raketnykh dvigateley [Rocket engine theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 464 p.
2. Dobrovolskii M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid propellant rocket engines]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2005, 488 p.
3. Babkina L. A., Sorokin D. V. *Modelirovanie techeniya zhidkosti i gaza v pakete SolidWorks Flow Simulation* [Simulation of liquid and gas flow in the SolidWorks Flow Simulation package]. Krasnoyarsk, Sib. St. Univ. Publ., 2012, 72 p.
4. Alyamovskii A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. *SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike* [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. St.Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 800 p.
5. Shesternya V. I., Alekseenko V. V., Kiryushkin G. A. [Designing a 3D model of low thrust LRE chamber with a cooling path for SLM printing]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and astronautics]. Krasnoyarsk, 2023, P. 250-252 (In Russ.).



**Секция**

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОНСТРУКЦИЯХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

УДК 621.56

## ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ЗА СЧЕТ НАНЕСЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КАНАВОК НА ТЕПЛООБМЕННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

А. О. Булов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: tema\_bulov@mail.ru

*В рамках данной работы рассмотрен вопрос повышения эффективности теплообменного оборудования за счет интенсификации теплообмена. Использование концевых выступов (канавок) один из эффективных путей решения эффективности теплообменного оборудования.*

*Ключевые слова: рекуперативный теплообменный аппарат, токарный станок, резьбовой резец, холодильная установка.*

## INTENSIFICATION OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS BY APPLYING INTERNAL GROOVES TO THE HEAT EXCHANGE SURFACE

A. O. Bulov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tema\_bulov@mail.ru

*Within the framework of this work, the issue of increasing the efficiency of heat exchange equipment due to the intensification of heat exchange is considered. The use of end projections (grooves) is one of the effective ways to solve the efficiency of heat exchange equipment.*

*Keywords: recuperative heat exchanger, lathe, threaded cutter, refrigeration unit.*

Интенсивность теплоотдачи можно увеличить за счет турбулизации потока, т. е. за счет увеличения внутренней поверхности теплообменного оборудования путем нанесения внутренних канавок. В качестве практического примера произведем обработку резанием (нанесение винтовой линии на внутренние поверхности) медных труб на токарно-винторезном станке. Использование медных труб с рифлеными внутренними поверхностями в качестве турбулизаторов потока достаточно технологично, ведь при этом не увеличивается наружный диаметр труб, это позволяет использовать такие трубы в тесных пучках и не изменять технологию сборки теплообменных аппаратов [1].

Турбулизация потока происходит в пристенном слое, что обеспечивает интенсификацию теплообмена. Трубы с внутренними рифлениями имеют внутреннюю увеличенную поверхность теплоотдачи по сравнению с прямой трубой того же диаметра и одинаковой длины. Теплоотдача трубы в атмосферу происходит только от поверхности и в результате чего увеличивается и теплоотдача [2].

Нарезание винтовой линии на внутренней поверхности медной трубы производим на токарно-винторезном станке марки JET GH 1640 ZX DRO.

В качестве инструмента выбираем резьбовой резец Т5К10 для получения внутренней канавки. Для трубы размером 1/2 используем резьбовой резец размером (10x10x120 мм) с шириной кромки 4 мм и шагом винтовых канавок  $P=1.75$  мм [3].

В секционном теплообменнике типа «труба в трубе» происходит дополнительное переохлаждение хладагента после конденсатора. Основная задача данного аппарата – снизить затраты на работу хладагента, по охлаждению рабочего тела, т. е. самого себя [4].

Полученный рекуперативный теплообменный аппарат показан на рис. 2. Данный теплообменный аппарат позволяет получить дополнительные 6К переохлаждения хладагента после конденсатора, при

этом разница холодопроизводительности составляет 11,3 кДж/кг. Это значит, что в нашей установке на 1К приходится практически 2 кДж/кг удельной холодопроизводительности. Процесс переохлаждения наиболее эффективен в низкотемпературных установках. В таких установках переохлаждение хладагента после конденсатора на 1 градус, позволяет повысить холодопроизводительность на 1 % [5].



Рис. 1. Угол подъема резца



Рис. 2. Экспериментальный рекуперативный теплообменный аппарат

Произведем моделирование процессов теплообмена в пакете SOLIDWORKS Simulation. Определим характеристики параметров температуры и скорости движения жидкого хладагента в рекуперативном ТА (рис. 3, 4).

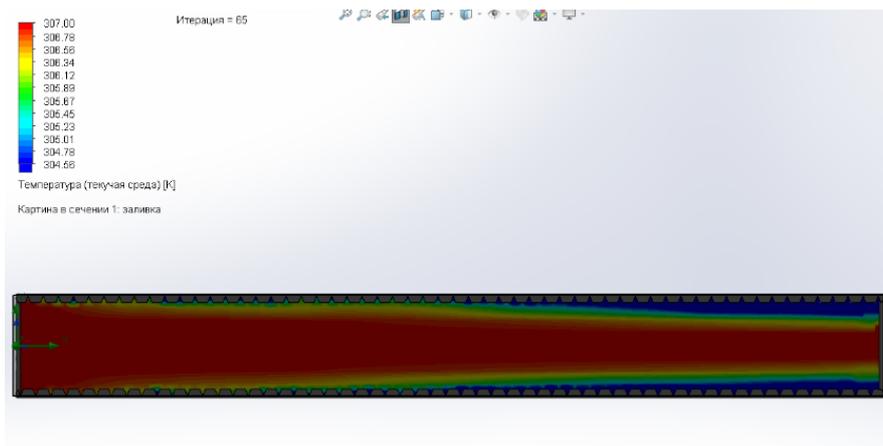


Рис. 3. Снижение температуры жидкого хладагента вблизи внутренних канавок трубы

Как видим из полученного результата, происходит уменьшение температуры вблизи внутренних поверхностей. На выходе из аппарата получаем дополнительные 6К переохлаждения жидкого хладагента.

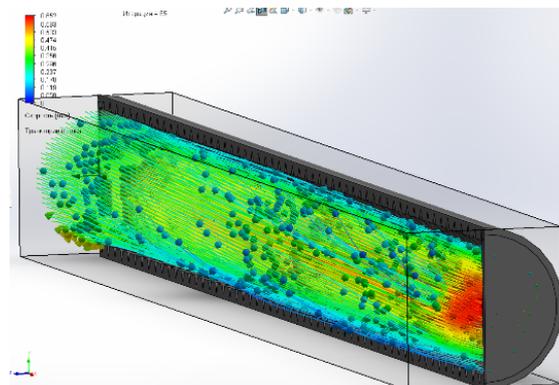


Рис. 4. Увеличение скорости движения хладагента по длине трубы

Таким образом применение рекуперативного теплообменного аппарата для увеличения производительности холодильной установки – актуальный вопрос в холодильной отрасли. Винтовая линия в данном аппарате с конкретным шагом позволяет повысить массовую холодопроизводительность. Разработка эффективных теплообменных аппаратов – актуальное направление исследования на сегодняшний день.

#### **Библиографические ссылки**

1. Кузма-Китча, Ю. А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2001, 112 с.
2. Ибрагимов, У. Х. Интенсификация теплообмена в каналах / Молодой ученый. 2016. № 8 (112). С. 225-229.2.
3. Резец резьбовой для внутренней резьбы [Электронный ресурс]. URL: <https://metalstanki.com.ua/metallorzhushhij-instrument/tokarnye-reztsy/rezets-rezbovoj-dlja-vnutrenney-rezby> (дата обращения 10.09.2023).
4. Перспективные разработки по совершенствованию теплообменных аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://openedu.urfu.ru/files/book/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B0%2013.html?ysclid=17nk4s0iq5535338289> (дата обращения 10.09.2023).
5. Зеликовский И. Справочник по теплообменным аппаратам малых холодильных машин. М.: Пищевая промышленность, 1978. 178 с.

#### **References**

1. Kuzma-Kitscha, Yu. Methods of heat transfer intensification. Moscow: Publishing House of the MEI, 2001, 112 p.
2. Ibragimov, U. Intensification of heat transfer in channels / Young scientist. 2016. No. 8 (112). pp. 225-229.
3. Threaded cutter for internal thread. Available at: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=713](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=713) (accessed 10.09.2023).
4. Promising developments to improve heat exchangers. Available at: <https://openedu.urfu.ru/files/book/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B0%2013.html?ysclid=17nk4s0iq5535338289> (accessed 10.09.2023).
5. Zelikovsky I. Handbook on heat exchangers of small refrigerating machines. M.: Food industry, 1978. 178 p.

© Булов А. О., 2023

УДК 621.311

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НА ВОДОНАПОРНЫХ СТАНЦИЯХ ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А. А. Исаченко\*, Н. В. Захарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: isa15122001@gmail.com

*Приведено описание автоматизированного теплотехнического контроля и его основные задачи. Представлены схемы контура системы автоматического управления и ее измерительного канала.*

*Ключевые слова: теплотехнический контроль, теплоснабжение, автоматизированные системы, измерительный канал.*

## AUTOMATED HEAT ENGINEERING CONTROL AT WATER PUMPING STATIONS FOR CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS

A. A. Isachenko\*, N. V. Zakharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: isa15122001@gmail.com

*The description of automated thermal control and its main tasks is given. The circuit diagrams of the automatic control system and its measuring channel are presented.*

*Keywords: heat engineering control, heat supply, automated systems, measuring channel.*

Автоматизированный теплотехнический контроль помогает обеспечить эффективное и надежное функционирование систем теплоснабжения, а также позволяет оперативно реагировать на любые изменения параметров системы для предотвращения возможных проблем [1].

Основные задачи теплотехнического контроля на водонапорных станциях заключаются в следующем:

1. Мониторинг и измерение основных параметров системы теплоснабжения, таких как температура, давление, расход воды и т.д.
2. Контроль и регулирование работы оборудования и процессов на станции, включая насосы, теплообменники, регуляторы давления и т.п.
3. Анализ и обработка данных, полученных в ходе измерений и мониторинга, для выявления возможных проблем и принятия своевременных решений по их устранению.
4. Ведение журналов и отчетов о работе системы, а также предоставление информации о состоянии системы и возможных проблемах соответствующим службам и органам.
5. Участие в разработке и реализации мероприятий по повышению энергоэффективности и надежности систем теплоснабжения [2].

Контур системы автоматического управления (САУ) представляет собой систему взаимодействующих между собой объекта управления и автоматического управляющего устройства (контроллера), а управление состоит в выработке команд, реализация которых обеспечивает целенаправленное изменение состояния этого объекта при соблюдении заранее обусловленных требований и ограничений. В процессе работы контроллер получает текущую информацию о цели управления, а также о текущем состоянии объекта и в соответствии с этой информацией формирует управляющее воздействие на объект так, чтобы была достигнута цель управления [3].

На рис. 1 измеряемый параметр регулируемой величины, характеризующий текущее состояние объекта управления, от датчика (Д) в виде унифицированного токового сигнала поступает на модуль аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) посредством подключения физической цепи с помо-

щью модуля клеммных соединений (МКС). Преобразованный в АЦП цифровой сигнал измеренного параметра по системной шине данных поступает прямо к центральному процессору контроллера (ЦП), в котором происходит формирование математического закона регулирования и обмен данными с подсистемами АСУТП. Алгоритм широтно-импульсной модуляции исходя от состояния объектов формирует управляющий эффект, который с помощью преобразователя цифровых импульсов (ЦИП) превращается в последовательные импульсы различной длительности и скважности. Далее управление постоянным напряжением, используя физическое соединение МКС с кабельными линиями связи, поступает на пусковое устройство (ПУ), необходимое для коммутации силовых цепей с управляющими, а затем посредством исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО) происходит прямое воздействие на объект управления [4].

В контуре автоматической системы измерительный канал (рис. 2) представлен от преобразователя измерительного параметра технологических параметров до места его представления.

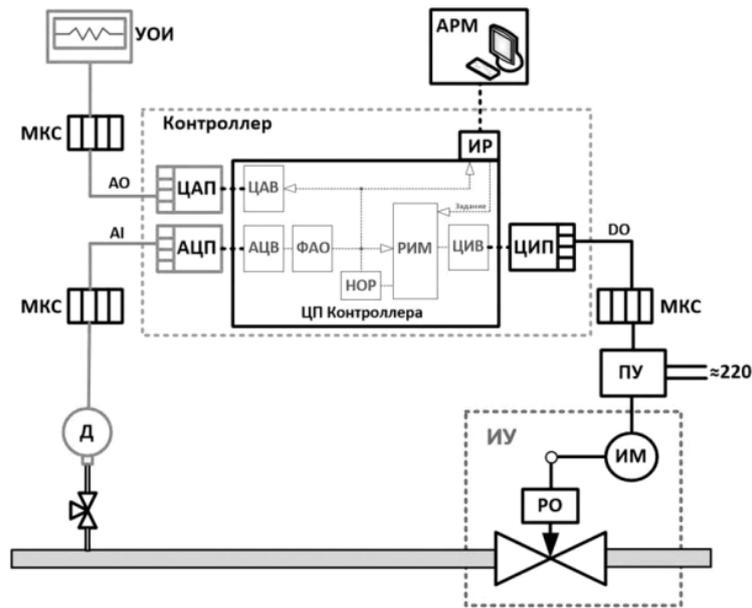


Рис. 1. Контур системы автоматического управления:

Д – измерительный преобразователь; МКС – модуль клеммных соединений;  
 АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЦИП – цифро-импульсный преобразователь; УОИ – устройство отображения информации; АРМ – автоматизированное рабочее место; ПУ – пусковое устройство; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; ИУ – исполнительное устройство; ЦП – центральный процессор; ИР – интерфейсный разъем; АЦВ – аналогово-цифровой ввод; ЦАВ – цифро-аналоговый вывод; ЦИВ – цифро-импульсный вывод; ФАО – формирователь аналоговый объективный; НОР – ноль-орган; РИМ – регулятор импульсный

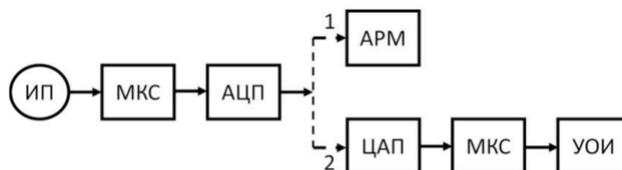


Рис. 2. Измерительный канал:

ИП – измерительный параметр; МКС – модуль клеммных соединений;  
 АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; АРМ – автоматизированное рабочее место; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;  
 УОИ – устройство отображения информации

Однако измерительные каналы, обеспечивающие допустимую погрешность и т. е. необходимую точность измерений, являются лишь частью контура системы контроля, выполняющей законченную задачу. Нужно помнить о том, что второй, еще не менее важный элемент контура является каналом управления воздействием.

После формирования математическим алгоритмом управляющих воздействий в данной части контура системы управления осуществляется преобразование и передача управляющих воздействий на технологический объект с целью поддержания каких-либо параметров на заданном уровне.

Применение автоматизированных систем контроля позволяет сократить затраты на обслуживание и эксплуатацию систем, повысить их эффективность и надежность, а также снизить риски возникновения аварийных ситуаций [5].

### Библиографические ссылки

1. Захарова Л., Мухин В. Теплотехнический контроль и автоматизация технологических процессов ТЭС и АЭС. М. : МЭИ, 2013. 195 с.
2. Системы дистанционной передачи показаний [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/80/550/1466.php> (дата обращения 10.09.2023).
3. Система – дистанционное измерение [Электронный ресурс]. Страница 1. URL: <https://www.ngpedia.ru/id425736p1.html> (дата обращения 10.09.2023).
4. Дистанционные измерительные устройства с электрическими каналами связи [Электронный ресурс]. URL: [https://studwood.net/2040048/tovarovedenie/distantsionnye\\_izmeritelnye\\_ustroystva\\_elektricheskimi\\_kanalami\\_svyazi](https://studwood.net/2040048/tovarovedenie/distantsionnye_izmeritelnye_ustroystva_elektricheskimi_kanalami_svyazi) (дата обращения 10.09.2023).
5. Богатенков, С., Борткевич Е. Автоматизация технической диагностики измерительных каналов с помощью автоматизированных средств учета энергии. 2016. № 1. С. 39–44.

### References

1. Zakharova L., Mukhin V. Thermal engineering control and automation of technological processes of thermal power plants and nuclear power plants. Moscow : MEI, 2013. 195 p.
2. Systems of remote transmission of readings [Electronic resource]. URL: <https://pandia.ru/text/80/550/1466.php> (accessed 10.09.2023).
3. System – remote measurement [Electronic resource]. Page 1. URL: <https://www.ngpedia.ru/id425736p1.html> (accessed 10.09.2023).
4. Remote measuring devices with electrical communication channels [Electronic resource]. URL: [https://studwood.net/2040048/tovarovedenie/distantsionny\\_eizmeritelnye\\_ustroystva\\_elektricheskimi\\_kanalami\\_svyazi](https://studwood.net/2040048/tovarovedenie/distantsionny_eizmeritelnye_ustroystva_elektricheskimi_kanalami_svyazi) (accessed 10.09.2023).
5. Bogatenkov, S., Bortkevich E. Automation of technical diagnostics of measuring channels using automated energy metering devices. Electrical safety. 2016. No. 1. pp. 39-44.

© Исаченко А. А., Захарова Н. В., 2023

УДК 662.99

## РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ

С. В. Наставникова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: sonyanastavnikova@gmail.com

*В работе рассмотрен способ повышения энергоэффективности алюминиевого производства путем рекуперации тепла технологических газов.*

*Ключевые слова: энергоэффективность, анодные газы, вторичные энергоресурсы, рекуперация тепла.*

## HEAT RECOVERY OF TECHNOLOGICAL GASES PRODUCED DURING ALUMINUM PRODUCTION

S. V. Nastavnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sonyanastavnikova@gmail.com

*The article presents a method for increasing the energy efficiency of aluminum production by recovering heat from process gases.*

*Keywords: energy efficiency, anode gases, secondary energy resources, heat recovery.*

В современном мире, где особое внимание уделяется решению экологических проблем, вопросам исчерпания природных ресурсов и повышения энергоэффективности, важное значение имеют технологии и установки, позволяющие более эффективно расходовать ресурсы и оказывать наименьшее техногенное воздействие на окружающую среду.

Производство первичных металлов сопровождается процессами, тепловые отходы которых могут быть полезно использованы. Теплота уходящих газов на металлургических производствах относится к одному из важнейших источников тепловых вторичных энергетических ресурсов, что позволяет решать ряд вышеуказанных задач и говорит об актуальности и значимости темы исследования. Требуется эффективный отвод тепла от элементов конструкции, в том числе с отходящими технологическими газами [1].

Производство алюминия – очень энергоемкий процесс, сопровождающийся образованием больших объемов газов повышенной температуры. Алюминий получают из бокситов процессом электролиза в специальных устройствах – электролизерах. При данном процессе в электролизной ванне обеспечивается температура 960 °С. Алюминий, обладающий большей плотностью, чем исходный расплав, собирается на дне электролизера, а выделяющийся при электролизе кислород взаимодействует с углеродом анода, который выгорает, образуя СО и СО<sub>2</sub> (анодные газы).

При получении алюминия путем электролиза, помимо потерь тепла в окружающее пространство с поверхностей устройства, а также уносимых с вылитым металлом, существуют потери тепла, уносимого отходящими газами [2-3].

Для сохранения окружающей среды и поддержания чистоты атмосферного воздуха в рабочей зоне корпусов электролизеров предусмотрена система сбора и очистки анодных газов. Отведенные газы имеют повышенную температуру и могут быть использованы в производственном процессе. Если

тепло технологических газов просто отводится в атмосферу, упускается один из самых эффективных способов повышения энергетической эффективности производства.

Как правило, алюминиевые заводы, в состав которых входят анодные производства, не испытывают дефицита горячей воды и пара на хозяйственные и производственные нужды. А в летнее время, напротив, имеет место проблема утилизации избытков тепла от печей прокаливания кокса и анодов. Поэтому одним из целесообразных способов является использование тепла анодных газов (удаляемых в систему газоотсоса) на нагрев глинозема перед его загрузкой в электролизную ванну, что увеличит скорость его растворения в расплаве и снизит риск образования осадков на дне ванны.

Основная идея рекуперации отработанного тепла заключается в том, чтобы улавливать тепло, образующееся в одной части объекта, и повторно использовать как можно большую его часть в других местах. Ключевым фактором для определения того, сколько тепла может быть извлечено и повторно использовано, является выбор технологии теплообменника.

В данном случае, с целью предотвращения конденсации паров смолистых веществ и их осаждения на стенках теплообменника, в устройстве рекуперации тепла необходимо предусмотреть ограничение количества утилизируемого тепла для поддержания температуры газов на выходе из теплообменника на уровне 80-100°C.

Для нагрева глинозема возможно использовать противоточный теплообменник (пластинчатый или кожухотрубный), который попутно выполняет роль бункера системы автоматической подачи глинозема (АПГ). При этом охлаждаемые газы движутся в трубах, а глинозем – в межтрубном пространстве.

Бункер-теплообменник системы АПГ целесообразно установить относительно электролизера таким образом, чтобы обеспечить возможность подачи нагретого глинозема на два смежных электролизера. При этом устройство должно быть установлено на высоте, обеспечивающей наклон труб подачи нагретого глинозема в электролизер под углом, превышающим естественный откос, т. е. не менее 45°. Схема размещения теплообменника и движения анодных газов из горелочного устройства в систему газоотсоса представлена на рис. 1.

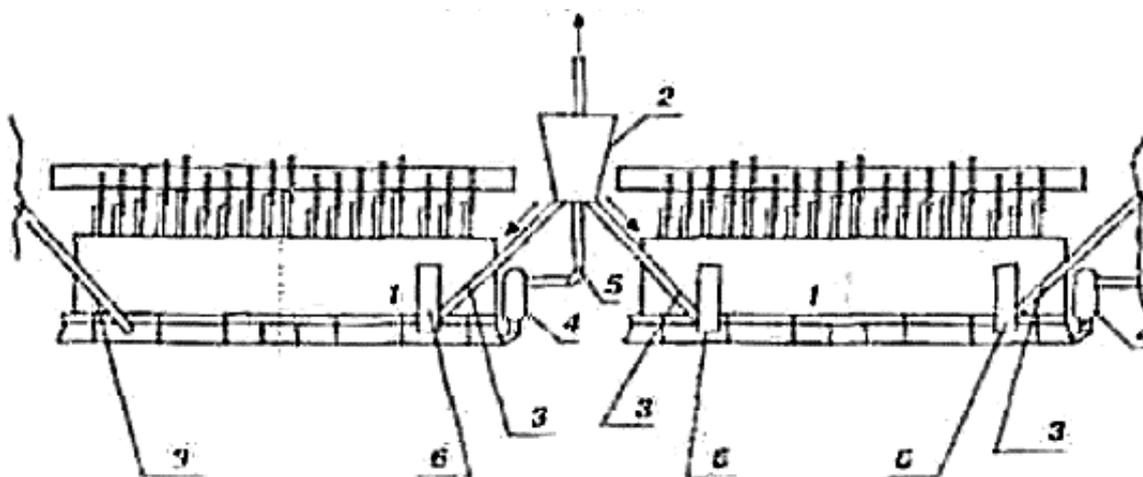


Рис. 1. Схема размещения бункера АПГ:

1 – электролизер, 2 – бункер-теплообменник системы АПГ, 3 – трубы подачи нагретого глинозема в электролизер, 4 – горелочное устройство электролизера, 5 – газоход отвода газов от электролизера, 6 – пробойник системы АПГ

Положительный эффект от применения устройства заключается в утилизации в теплообменнике 10-15% тепла, уносимого в систему газоотсоса, и обеспечении нагрева глинозема, а его загрузка в электролизер уменьшает потребление электроэнергии. Охлаждение анодных газов в теплообменнике уменьшает их объем в 2–2,5 раза, а также вязкость и статическое давление на стенки газоходов. Энергетические затраты снижаются на 20–25 % по сравнению с отводом традиционным способом [4-5].

Таким образом, использование тепла анодных газов, в рассмотренном теплообменном устройстве, позволяет не только наиболее эффективно расходовать энергоресурсы и утилизировать тепловые от-

ходы, но и ускоряет рабочий процесс производства алюминия путем предварительного прогрева глинозёма, а также позволяет снизить затраты на эксплуатацию газоочистной системы. Положительные эффекты от рекуперации тепла технологических газов, образующихся при производстве алюминия, показывают необходимость дальнейшей работы в данном направлении.

### Библиографические ссылки

1. Иващенко Е. Ю. Технологии утилизации тепловых отходов. Минск: БНТУ, 2014, 108 с.
2. Электрометаллургия. Получение алюминия [Электронный ресурс] URL: [http://icmim.sfu-kras.ru/edu/chemistry/SPM/res/polA1\\_.html](http://icmim.sfu-kras.ru/edu/chemistry/SPM/res/polA1_.html) (дата обращения: 09.08.2023).
3. Metallurgy. Constructions electrolyzers aluminum [Электронный ресурс] URL: <https://znaesh-kak.com/q/a/конструкции-электролизеров-алюминия> (дата обращения: 09.08.2023).
4. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера / С. Г. Шахрай, А. П. Скуратов, В. В. Кондратьев, В. А. Ершов // Цветные металлы, 2016. №2, С. 52-57.
5. Разработка теплообменного устройства для рекуперации тепла при производстве алюминия / И. А. Сысоев, В. В. Кондратьев, И. В. Колмогорцев, Т. И. Зимина // Цветные металлы, 2017. №7 [Электронный ресурс] URL: <https://www.rudmet.ru/journal/1643/article/28229/> (дата обращения: 11.08.2023).

### References

1. Ivashchenko E. Yu. *Tekhnologii utilizacii teplovyh othodov* [Technologies for recycling thermal waste] Minsk: BNTU, 2014, 108 p.
2. Aluminum production (In Russ.). Available at: [http://icmim.sfu-kras.ru/edu/chemistry/SPM/res/pol%D0%901\\_.html](http://icmim.sfu-kras.ru/edu/chemistry/SPM/res/pol%D0%901_.html) (accessed 09.08.2023).
3. Constructions aluminum electrolyzers (In Russ.). Available at: <https://znaesh-kak.com/q/a/конструкции-электролизеров-алюминия> (accessed 09.08.2023).
4. Shakhrai S. G., Skuratov A. P., Kondratyev V.V., Ershov V.A. [Utilization of heat from the anode gases of an aluminum electrolyzer], *Cvetnye metally*, 2016, №2, p. 52-57 (In Russ.).
5. Sysoev I. A., Kondratyev V. V., Kolmogortsev I. V., Zimina T. I. [Development of a heat exchange device for heat recovery in aluminum production], *Cvetnye metally*, 2017, №7 (In Russ.).

© Наставникова С. В., 2023

УДК 621.311

## ФРЕОНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

С. В. Наставникова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: sonyanastavnikova@gmail.com

*В работе рассмотрена возможность применения фреона в энергоустановках.*

*Ключевые слова: энергетическая эффективность, фреон, низкокипящее рабочее тело.*

## FREON TECHNOLOGIES IN POWER PLANTS

S. V. Nastavnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sonyanastavnikova@gmail.com

*In the article presents the possibility of using freon in power plants.*

*Keywords: energy efficiency, freon, low-boiling working fluid.*

В ходе повседневной деятельности предприятий с различными теплоносителями сбрасывается огромное количество тепла, возможность использования которого в рабочем цикле предприятия, либо для выработки дополнительной электроэнергии в данное время является актуальной задачей. Однако низкие температуры большинства источников тепла и их негазообразное состояние, а также отсутствие высокого давления в газообразных источниках, не дают возможности использовать их тепловую энергию напрямую. Такую энергию источников тепла возможно снимать при помощи низкокипящих рабочих тел (НРТ).

Для этих целей могут использоваться энергоустановки, которые используют в качестве рабочего тела фреон, обладающий низкой температурой кипения и другими специфическими свойствами, что представляет интерес для исследований и поиска современных технологий, позволяющих повышать эффективность производства [1].

При этом в мире широко распространены установки, основанные на цикле Ренкина, где различные органические вещества применяются в качестве рабочего тела, однако в большинстве своем они используют в качестве источников альтернативные виды энергии. Учитывая особенности ведения производственной деятельности в России, интерес также представляет совершенствование существующих предприятий путём использования вторичного тепла.

Традиционно фреон, представляющий собой фторсодержащее производное от насыщенных углеводородов, используется в качестве хладагентов в холодильном оборудовании, а также в системах газового пожаротушения. Однако применение энергоустановок, использующих в качестве рабочих тел фреоны, до сих пор не встретило такого же повсеместного распространения в нашей стране. К тому же, условия для реализации подобных проектов усложнились из-за ужесточения требований к низкокипящим рабочим телам (например, сейчас многие производители отказались от фреона R-22, которым еще недавно заправляли до 90% всех кондиционеров и сплит-систем), поэтому на сегодняшний день важное значение имеет также выбор альтернативных хладагентов с оптимальными параметрами [2].

Основными техническими требованиями к рабочему телу в установках являются:

- По экономическим показателям: низкая стоимость и доступность;

- По экологическим показателям: нетоксичность, взрыво- и пожаробезопасность, отсутствие негативных экологических последствий и эффектов;
- По физико-химическим показателям: высокие значения плотности и теплопроводности, низкая вязкость и отсутствие коррозионной активности;
- По термодинамическим показателям: низкая температура кипения при давлении не ниже атмосферного, термическая стабильность в области повышенных температур, а также обеспечение максимальной удельной работы в области рабочих температур [3].

Исходя из экологических и экономических соображений, рабочее тело обязательно должно использоваться многократно (рабочий контур должен иметь замкнутую схему), что позволит избежать отрицательного воздействия на окружающую среду путем выброса отработавшего фреона из системы, а также снизить вероятность ущерба для здоровья человека.

Рассмотрим установку, состоящую из емкости с рабочим телом, насоса, испарителя, конденсатора и турбогенератора, в качестве рабочего тела которой используется фреон. Рабочий цикл системы включает в себя четыре участка (рис. 1). На участке 1–2 происходит подача рабочего тела насосом в испаритель, при этом увеличивается давление фреона в системе и незначительно повышается температура (за счет потерь трения). На участке 2–3 рабочее тело испаряется и перегревается в испарителе при постоянном давлении. На участке 3–4 тепловая энергия фреона переходит в механическую энергию, при этом на валу турбины понижается давление и температура. На участке 4–1, для осуществления замкнутого цикла работы, происходит конденсация рабочего тела до параметров рабочего тела на входе в насос. Для повышения эффективности работы данной системы можно осуществлять частичный перевод фреона в жидкую фазу, увеличивая область использованной энергии, переданной при нагреве рабочего тела.

Дополнительно необходимо учитывать такую особенность низкокипящих рабочих тел как переменный показатель адиабаты, зависящий от давления и температуры, при этом аналитической зависимости показателя адиабаты от температуры не существует [4].

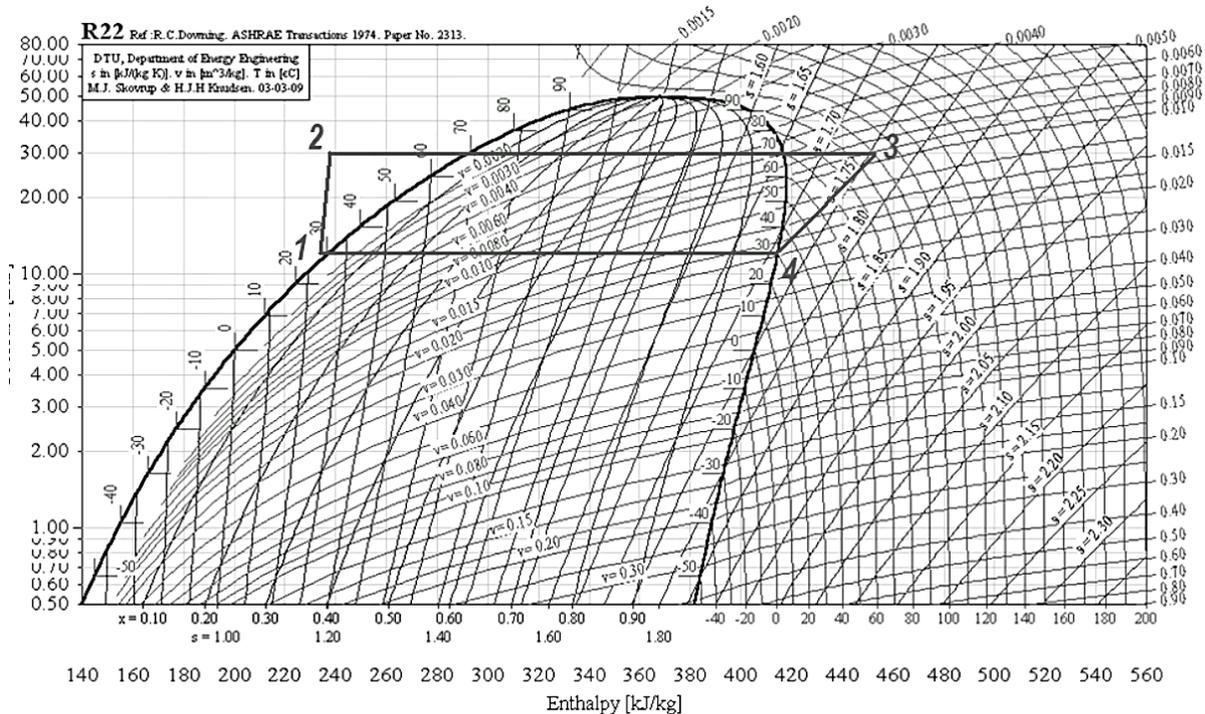


Рис. 1. Цикл установки в Lg P–I координатах

На теплоэлектростанциях фреоновые технологии могут быть внедрены и в термодинамический цикл паротурбинной установки в качестве холодного источника, отводящего тепло в конденсаторе. При этом фреоновый контур вытесняет традиционную систему технического водоснабжения, а связующим звеном между паротурбинной установкой и фреоновым контуром является установленный вместо конденсатора испаритель. Принцип действия заключается в следующем: отработанный водя-

ной пар после паровой турбины поступает в испаритель, где конденсируется за счет передачи теплоты НРТ, затем в испарителе образуется пар хладагента с максимальными параметрами, который и подается на фреоновую турбину для выработки дополнительной мощности. Отработанный фреон направляется в трубчатый конденсатор, установленный в сухой градирне, куда подается атмосферный воздух. Сконденсировавшийся хладагент подается насосом в испаритель, образуя замкнутый контур на фреоне. Таким образом данная технология позволяет повысить выработку электроэнергии без затрат топлива и увеличить эффективность системы.

Еще одним направлением применения фреоновых технологий является использование фреоновых термотрансформаторов (ФТТ) в системах теплоснабжения. Одной из таких схем является ТЭЦ с газовым сетевым подогревателем и ФТТ. По этой схеме сетевая вода в течение всего года подогревается до 70 °С в газовом сетевом подогревателе уходящими из газовой турбины газами. При включении отопительной нагрузки сетевая вода параллельно подогревается в традиционном сетевом подогревателе и поступает к ФТТ. Сетевая вода, подводимая от ТЭЦ как основного источника теплоснабжения, охлаждается в испарителе ФТТ, при этом фреон испаряется. Затем пар сжимается компрессором и поступает в конденсатор, после конденсации дросселируется, а в конденсаторе нагревается идущая на отопление внутриквартальная сетевая вода теплопотребителя [5].

Таким образом, применение рассмотренных фреоновых технологий обеспечивает значительный прирост КПД систем и позволяет осуществлять более энергоэффективные и экономичные производственные процессы на предприятиях, что является одними из приоритетных задач энергетики на данный момент.

#### Библиографические ссылки

Ивашенко Е.Ю. Технологии утилизации тепловых отходов. Минск: БНТУ, 2014, 108 с.

Фреон, хладагенты свойства, виды, применение [Электронный ресурс] URL: <https://metatorg.ru/spravochnik/freon-khladogenty-svoystva-vidy-primenenie/> (дата обращения: 15.08.2023).

Крупин Д. Ф. Оптимальный выбор рабочих тел для энергоустановок на базе органического цикла Ренкина, Вятский государственный университет, с. 152-154.

Морозов Н. В., Карасев В. П. Паровые турбины на низкокипящем рабочем теле, 2010, с. 102-106.

Применение фреоновых технологий на тепловых электрических станциях / Голубева Л.Ф., Григорьева О.К., Францева А.А. // Научный вестник НГТУ, том 65, № 4, 2016, с. 164–174.

#### References

1. Ivashchenko E. Yu. *Tekhnologii utilizacii teplovyh othodov* [Technologies for recycling thermal waste] Minsk: BNTU, 2014, 108 p.

2. Freon, properties of refrigerants, types, application (In Russ.). Available at: <https://metatorg.ru/spravochnik/freon-khladogenty-svoystva-vidy-primenenie/> (accessed: 15.08.2023).

3. Krupin D. F. [Optimal selection of working fluids for power plants based on the organic Rankine cycle] Vyatka State University, p. 152-154 (In Russ.)

4. Morozov N.V., Karasev V.P. [Steam turbines on a low-boiling working fluid] 2010, p. 102-106 (In Russ.)

5. Golubeva L.F., Grigorieva O.K., Frantseva A.A. [Application of freon technologies at thermal power plants], Nauchnyj vestnik NGTU, tom 65, № 4, 2016, p. 164–174 (In Russ.)

© Наставникова С. В., 2023

УДК 629.78

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

А. Д. Оленева

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: olenevaad@iss-reshetnev.ru

*Рассматривается проектирование системы терморегулирования энергетической установки повышенной мощности КА для отвода тепловой энергии в количестве 200 кВт.*

*Ключевые слова: энергетическая установка повышенной мощности, система терморегулирования, тепловая труба, холодильник-излучатель, радиационная панель.*

## DESIGN OF A THERMAL CONTROL SYSTEM FOR A HIGH-POWER POWER PLANT

A. D. Oleneva

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: olenevaad@iss-reshetnev.ru

*The design of a spacecraft's thermal control system for a high-power power plant to remove thermal energy in the amount of 200 kW is being considered.*

*Keywords: high-power power plant, thermal control system, heat pipe, radiator-refrigerator, radiation panel.*

В настоящее время для расширения возможностей космических аппаратов (КА) разрабатываются и создаются энергетические установки повышенной мощности (ЭУПМ) для выработки электрической и тепловой энергии [1].

Высокая энерговооруженность, автономность, компактность, возможность достижения длительного ресурса функционирования делают ЭУПМ более выгодными для применения на КА по сравнению с другими энергосистемами.

Использование ЭУПМ является одним из перспективных направлений в космической отрасли. Дальнейшее развитие космонавтики в XXI веке неизбежно связано с существенным повышением энерговооруженности космических аппаратов, требуемой для решения энергоемких задач в околоземном пространстве, для осуществления межпланетных перелетов и реализации длительных миссий на поверхностях планет.

Одной из основных задач при использовании ЭУПМ на борту КА является отвод тепла в окружающую среду. Так как уровень отводимой тепловой мощности для средних ЭУПМ составляет порядка 200 кВт, то для отвода такого количества тепла требуются высокопроизводительные системы терморегулирования (системы охлаждения) [1].

Система терморегулирования КА, в составе которого используется ЭУПМ, представляет собой сложную техническую систему, которая имеет характерные особенности:

- высокие рабочие температуры;
- термостойкий теплоноситель;
- большая площадь поверхности излучения.

Целью данной работы является проектирование системы охлаждения ЭУПМ КА для отвода тепловой энергии в количестве 200 кВт и оптимизация массы системы.

В процессе проектирования системы охлаждения ЭУПМ КА были решены следующие задачи:

- исследование особенностей систем терморегулирования КА на базе ЭУПМ;
- тепловой расчет холодильника-излучателя (ХИ);
- расчет высокотемпературной газорегулируемой тепловой трубы (ТТ);
- оптимизация толщины излучающего ребра;
- оптимизация проходного диаметра соединительных магистралей контура охлаждения.

При выполнении поставленных задач использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB.

Одним из вариантов высокоэффективной системы отвода тепла является высокоэффективный охлаждающий контур с холодильником-излучателем. Разработанная схема системы охлаждения ЭУПМ КА с входящими в ее состав элементами представлена на рис. 1. Область исследования данной работы выделена красным цветом.

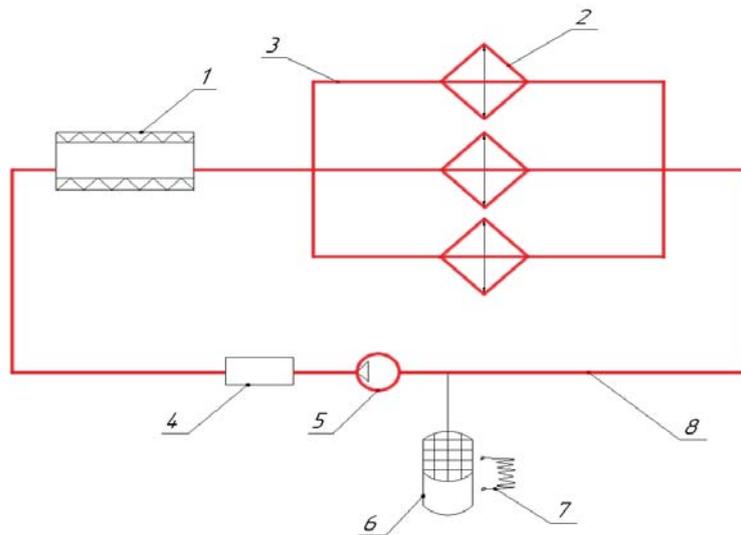


Рис. 1. Схема системы охлаждения ЭУПМ КА:

- 1 – гидротракт внутри источника энергии; 2 – радиационная панель;
- 3 – соединительный трубопровод между коллектором и магистральным трубопроводом; 4 – электрообогреватель контура; 5 – насос;
- 6 – компенсационный бак; 7 – электрообогреватель компенсационного бака;
- 8 – магистральный трубопровод

ХИ, предназначенный для сброса в космическое пространство не преобразованной в электрическую энергию теплоты источника, состоит из 3-х радиационных панелей. Вид радиационной панели представлен на рис. 2. Радиационная панель представляет из себя конструкцию в виде коллектора и газорегулируемых ТТ [2], встроенных теплоприёмочной частью в проточный канал и имеющих вдоль своей свободной поверхности излучающие ребра.

Работоспособность ТТ подтверждается расчетом накладываемых на них ограничений по передаваемой мощности [2].

Для компактного размещения космического аппарата с ЭУПМ на ракете-носителе ХИ выполняется в виде трансформируемой конструкции. В данной работе были рассмотрены два варианта раскрытия ХИ: с коэффициентами видимости для радиационной панели с двухсторонним излучением, суммарно равными 1,5 и 1,9.

Для решения задачи оптимизации в качестве критерия качества принято требование минимизации массы системы охлаждения.

В ходе работы получены следующие результаты:

- спроектирована высокоэффективная система охлаждения ЭУПМ КА, обеспечивающая сброс заданного количества излишков тепловой энергии в космическое пространство;
- подтверждена работоспособность ТТ;
- определена доза заправки ТТ теплоносителем;
- определены размеры газового резервуара ТТ и доза заправки инертным газом;

- проведены расчет и оптимизация массы ХИ;
- получены оптимальные значения толщины излучающего ребра и диаметров соединительных магистралей контура охлаждения, обеспечивающих минимальную массу системы охлаждения ЭУПМ КА.

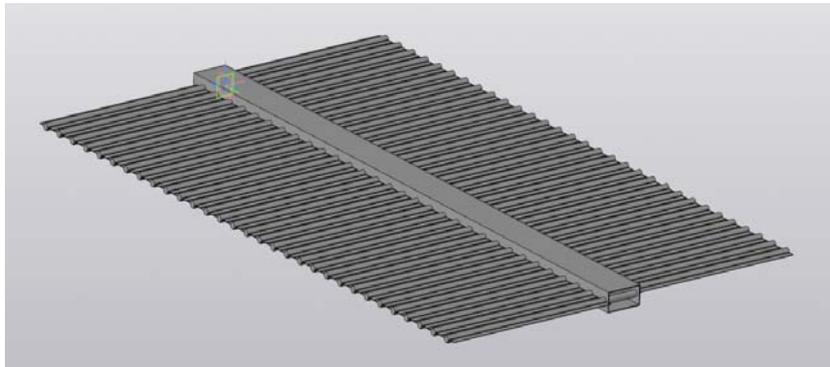


Рис. 2. Радиационная панель

Результаты проектирования системы охлаждения демонстрируют возможность создания высоко-мощных и эффективных систем терморегулирования, что позволит существенно повысить энерго-вооруженность КА за счет использования высокомошной энергоустановки.

#### Библиографические ссылки

1. Ядерные орбитальные комплексы [Текст]: учебник [для вузов] / А. Г. Мильковский [и др.]; ред. В. Д. Атамасов; Конструктор. бюро "Арсенал" им. М. В. Фрунзе, БГТУ "ВОЕНМЕХ"[и др.]. СПб.: Проффессионал, 2016. 796 с. ISBN 978-5-91259-114-3
2. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: Пер. с англ. М.: Энергия, 1979 г. 272 с., ил.

#### References

1. Mil'kovskiy A.G. Yadernyye orbital'nyye komplekсы [Nuclear orbital complexes]. Eds. V.D. Atamasov. Saint Petersburg, Professional, 2016, 796 p.
2. DUNN P. D., REAY D. A., Heat Pipes, Pergamon Press, 1976, 272 p.

© Оленева А. Д., 2023

УДК 629.785

## ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИИ ВХОДА В РАБОЧЕЕ КОЛЕСО РАДИАЛЬНОЙ МИКРОТУРБИНЫ НИЗКОЙ БЫСТРОХОДНОСТИ

Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков, М. Г. Мелкозеров, А. А. Кишкин, М. У. Абдуллаев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*В данной работе рассмотрена проблема формирования входного участка в радиальную микротурбину низкой быстроходности,  $n_{st} < 40$ , определяемой малыми объемными расходами и мощностями в области до 500 Вт. Основные выводы сделаны на основе предложенного анализа кинематики потока на входе и выходе в рабочее колесо как влияющего параметра на окружающую работу турбины. Предложенные рекомендации актуальны для турбин низкой быстроходности, имеющих априори относительно низкий КПД и требующих тщательности при оптимизации энергии турбины.*

*Ключевые слова:* микротурбина, коэффициент быстроходности, планы скоростей, вход в микротурбину, окружная работа, оптимизация КПД.

## ASSESSMENT OF THE GEOMETRY OF THE INLET INTO THE RUNNER WHEEL OF A LOW SPEED RADIAL MICROTURBINE

Yu. N. Shevchenko, A. V. Delkov, M. G. Melkozerov, A. A. Kishkin, M. U. Abdullaev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*This paper considers the problem of forming the entrance section to a low-speed radial microturbine,  $n_{st} < 40$ , determined by low volumetric flow rates and powers in the region of up to 500 W. The main conclusions are drawn on the basis of the proposed analysis of the kinematics of the flow at the inlet and outlet of the impeller as an influencing parameter on the circumferential operation of the turbine. The proposed recommendations are relevant for low-speed turbines, which have a priori relatively low efficiency and require care when optimizing the turbine energy.*

*Keywords:* microturbine, speed factor, speed plans, microturbine entrance, circumferential operation, efficiency optimization.

При тенденции роста мощностей космических платформ основным ограничением массогабаритных и энергетических характеристик полезной нагрузки космического аппарата является площадь радиатора-излучателя для сброса тепла в черный космос, обеспечивающая работоспособность системы обеспечения теплового режима полезной нагрузки, кроме того радиатор выполняет роль конструктивной панели и в значительной мере определяет массу служебного модуля космического аппарата. С целью снижения теплового потока в радиатор предлагается утилизировать часть парового потока хладагента в турбогенераторном блоке до радиатора. В качестве турбины используется радиально-центростремительное рабочее колесо низкой быстроходности  $n_{st} < 40$  [1].

Примем допущение, что для достижения максимума КПД ступени, потерь на парциальность нет, поток подводится ассимметрично по периметру входа в рабочее колесо под углом  $\alpha_1$ ; угол  $\beta_{2n} = 90^\circ$ ; степень реактивности  $\rho_k = 0,5$ . Треугольники скоростей представлены рис. 1.

Из допущения следует выражение для радиальной составляющей абсолютной скорости на входе в рабочее колесо (РК):

$$C_{1R} = \frac{\dot{V}}{2\pi R_1 b_1}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – радиус входа в РК;  $b_1$  – ширина колеса на входе;  $\dot{V}$  – объемный расход через РК.

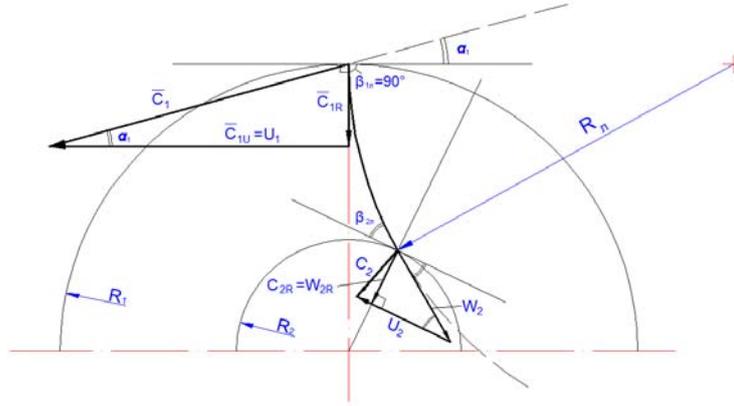


Рис. 1. Треугольники векторов скоростей на входе и выходе из рабочей решетки

Окружная составляющая абсолютной скорости на входе в РК (рис. 1) [2]:

$$C_{1u} = \frac{C_{1R}}{\operatorname{tg} \alpha_1} = C_{1c} \cdot \sin \alpha_1. \quad (2)$$

Окружная составляющая абсолютной скорости на выходе из РК (рис.1):

$$C_{2u} = u_2 - \frac{C_{2R}}{\operatorname{tg} \beta_{2,l}} = u_2 - W_{2u}, \quad (3)$$

где окружная составляющая относительной скорости  $W_{2u}$  определяется выражением:

$$W_{2u} = \frac{C_{2R}}{\operatorname{tg} \beta_{2,l}}. \quad (4)$$

Радиальная составляющая абсолютной относительной скорости на выходе:

$$C_{2R} = W_{2R} = \frac{\dot{V}}{2\pi R_2}. \quad (5)$$

Согласно закону изменения момента количества движения для потока с массовым расходом  $\dot{m}$  имеем исходное выражение:

$$M = \dot{m} [C_{1u} R_1 - C_{2u} R_2]. \quad (6)$$

используя выражение (1...5):

$$M = \dot{m} \left[ \frac{C_{1R}}{\operatorname{tg} \alpha_1} R_1 - \left( u_2 - \frac{C_{2R}}{\operatorname{tg} \beta_{2,l}} \right) R_2 \right],$$

продолжив подстановки для  $C_{1R}$  и  $C_{2R}$  и учтем, что  $L_u \cdot \dot{m} = M \cdot \omega$ :

$$L_u \cdot \dot{m} = M \cdot \omega = \omega \cdot \dot{m} \left[ \frac{\dot{V} R_1}{2\pi R_1 b_1 t g \alpha_1} - \left( \omega R_2 - \frac{\dot{V}}{2\pi R_2 b_2 t g \beta_{2,l}} \right) \cdot R_2 \right],$$

окончательно имеем:

$$L_u = \omega \left[ \frac{\dot{V}}{2\pi b_1 t g \alpha_1} - \left( \omega R_2 - \frac{\dot{V}}{2\pi b_2 t g \beta_{2,l}} \right) \right], \quad (7)$$

или

$$L_u = \frac{\omega \cdot \dot{V}}{2\pi} \left( \frac{1}{b_1 t g \alpha_1} + \frac{1}{b_2 t g \beta_{2,l}} \right) - \omega R_2^2. \quad (8)$$

Из выражений (7; 8) следует вывод, что для увеличения удельной окружной работы турбин необходимо уменьшать ширину лопаток, однако существует ряд ограничений:

- при реальном исполнении  $b_1$  и  $b_2 \rightarrow 0$  силовое взаимодействие поверхности лопаток и потока нивелируются [3];

- теоретически достижимая скорость  $C_{ад}$  определена перепадом энтальпий и техническими достижима в сопле как скорость истечения  $C_1 = \frac{V}{F_{сопла}}$ ;

- при  $b_1$  и  $b_2 \rightarrow 0$ , увеличивается относительная скорость в рабочем колесе, что приводит к квадратному росту гидравлических потерь  $\Delta L_{ном} = \zeta_k \frac{W^2}{2}$ .

Задача максимизации окружной работы турбины является оптимизационной для математической модели турбины для конкретных граничных и режимных условий вытекающих из технического задания. В результате предварительного анализа аналогичных конструкций турбодетандора с подобной геометрией ширина рабочего колеса на входе достигает 1 мм.

### Библиографический список

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УРАВНЕНИЙ ИМПУЛЬСОВ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ ГАЗОВЫХ ТУРБИН *Кишкин А.А., Зуев А.А., Делков А.В., Шевченко Ю.Н.* Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 45-60.
2. Шилкин О.В., Кишкин А.А., Зуев А.А., Делков А.В., Лавров Н.А. Проектирование системы пассивного охлаждения бортового комплекса космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.
3. Shilkin O.V., Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Lavrov N.A. *Design of the passive cooling system of the onboard space complex the device.* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. 2021. Vol. 28. No. 2. pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.

### References

1. ANALYTICAL APPROACH IN THE STUDY OF BOUNDARY LAYER PULSE EQUATIONS DURING FLOW IN THE INTERSCAPULAR CHANNEL OF GAS TURBINES *Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Shevchenko Yu.N.* Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2021. Vol. 28. No. 1. pp. 45-60.
2. Shilkin O.V., Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Lavrov N.A. Design of the passive cooling system of the onboard complex of the spacecraft // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2021. Vol. 28. No. 2. pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106 .
3. Shilkin O.V., Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Lavrov N.A. Design of the passive cooling system of the onboard space complex "Instrument". [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. 2021. Volume 28. No. 2. pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.

УДК 629.785

## ВОЗМОЖНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

О. В. Шилкин<sup>1</sup>, Ю. Н. Шевченко<sup>2</sup>, А. А. Кишкин<sup>2</sup>, А. В. Делков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: spsp99@mail.ru

*На основании обзора конструкции двухфазных систем терморегулирования (СТР) предложена определенная систематизация конструкции по четырем типам. Отмечены основные конструктивные элементы: теплообменные аппараты, контурные нагнетатели, как электромеханические, так и капиллярные насосы, тепловые интерфейсы и контурные трубопроводы.*

*Ключевые слова: космический аппарат, контурные нагнетатели, капиллярные насосы, струйные насосы, система терморегулирования, тепловой режим космического аппарата.*

## POSSIBLE DESIGN OPTIONS FOR TWO-PHASE THERMAL CONTROL SYSTEMS OF A SPACECRAFT

O. V. Shilkin<sup>1</sup>, Yu. N. Shevchenko<sup>2</sup>, A. A. Kishkin<sup>2</sup>, A. V. Delkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: spsp99@mail.ru

*Based on the review of the design of two-phase thermal control systems (TDS), a certain systematization of the design according to four types is proposed. The main structural elements are marked: heat exchangers, contour superchargers, both electromechanical and capillary pumps, thermal interfaces and contour pipelines.*

*Keywords: spacecraft, contour superchargers, capillary pumps, jet pumps, temperature control system, thermal regime of the spacecraft.*

Видимые большие преимущества двухфазных контуров СТР заставили в различных странах начать поиск оптимальных схем и конструкций агрегатов, которые можно применять в космических условиях.

Появление программ создания больших космических платформ стимулировало разработку двухфазных СТР в США, Европейских странах, СССР. В 80-е годы наблюдается резкий рост числа публикаций по СТР с двух фазным контуром (ДФК), которые можно разбить на следующие типы:

- насосные двухфазные контуры теплопереноса;
- пассивные контуры теплопереноса с прокачкой теплоносителя капиллярными или струйными насосами, реализующими прямой термодинамический цикл (термо-циркуляционные контуры – ТЦК);
- контуры, реализующие обратный термодинамический цикл (тепловые насосы);
- гибридные схемы ДФК [1].

В США эти работы координирует комитет OAST, в реализации программ по двухфазным СТР участвуют центры NASA Johnson, Marshall, Goddard, Lewis и фирмы Boeing, Lockheed, Grumman, Sundstrand, Martin Marietta Aerospace, Mt. Douglas и другие.

В работах по ДФК в рамках Европейского Космического Агентства (ESA), координируемых фирмой Dornier (Германия), участвуют фирмы British Aerospace (Великобритания), Fokker (Голландия), Aeritalia (Италия) и другие. Исследования по двухфазным СТР ведутся также в NASDA (Япония), Академии космической технологии и Институте разработки систем космических аппаратов (Китай).

В СССР значительный объем НИОКР по этим направлениям выполнен РКК «Энергия» с привлечением ряда организаций, специализирующихся в области исследования процессов тепломассообмена (Центр Келдыша, МВТУ им. Баумана, МЭИ, ХАИ, ИТМО, ГИПХ, ВИЛС, а также в НПО ПМ (г.Красноярск), НПО им. С.А. Лавочкина (совместно с Институтом теплофизики УрО РАН).

Как показали исследования отечественных и зарубежных специалистов, для широко разветвленных систем большой производительности с большим количеством источников тепла наиболее оптимальным является использование СТР с ДФК, в которых транспортирование теплоносителя обеспечивается механическим насосом.

Результаты проведенных исследований были реализованы в проектах СТР с ДФК для американской космической станции «FREEDOM», европейской станции «COLUMBUS», российских: орбитальная космическая станция (ОКС) «МИР-2», международная космическая станция (МКС). Во всех проектах СТР реализована концепция «тепловой шины», при которой основой является централизованная система теплоотвода (ЦСТО) всей станции. ЦСТО включает: центральный теплообменный контур с двухфазным теплоносителем, радиационные теплообменники (РТО) для сброса избыточного тепла станции, тепловые интерфейсы для объединения центрального контура с автономными теплообменными контурами различных модулей и полезных грузов. При этом обеспечиваются стабильные условия теплоотвода при любом количестве подстыкованных модулей и при различных тепловых нагрузках [2].

Описание принципов работы СТР с ДФК и состава комплектующих рассматриваемых схем приведены в технических предложениях

ТП 783.360-5618-06 по ОКР «СТР с ДФК».

Рассмотренные варианты ЦСТО с ДФК для космической станции (КС) очень близки по конфигурации и особенностям функционирования, однако, отличаются составом, конструктивным исполнением устройств подвода, транспортирования и сброса тепла, способами подачи теплоносителя на испарение, а также принципом организации замкнутого парожидкостного цикла теплоносителя в ДФК.

В схемах ДФК зарубежных специалистов теплоноситель нагнетается в коллектор, из которого через регуляторы подачи жидкости поступает в параллельные ветви с теплообменниками – испарителями, в которых испаряется. Образовавшийся пар поступает в конденсаторы, где конденсируется и возвращается в виде конденсата на вход насоса.

Принципиальным отличием ДФК разработки отечественных специалистов является организация в контуре жидкостной петли однофазного теплоносителя.

Из этой петли организован отбор теплоносителя на испарение в испарительный теплообменник (ИТ). Образовавшийся пар конденсируется в теплообменнике – конденсаторе РТО и возвращается в виде конденсата в жидкостную петлю контура. Организация однофазной жидкостной петли в контуре обеспечивает стабильную работу электронасосного агрегата на переходных режимах работы ДФК, создания кавитационного запаса на входе в насос, улучшает реакцию контура на возможные быстрые внешние воздействия [3].

Модельный образец СТР с ДФК – аналог ЦСТО МКС, разработанный в РКК «Энергия», успешно прошел испытания в условиях невесомости в составе летной экспериментальной установки (ЛЭУ-1) на борту ТГК «Прогресс».

В процессе проведения натурных испытаний ЛЭУ-1 подтверждена работоспособность ДФК и его элементов в двухфазном режиме работы в широком диапазоне тепловых нагрузок при различных уровнях настройки температуры кипения теплоносителя в контуре.

На основании анализа существующих схем ДФК, степени их отработанности в условиях невесомости за базовый вариант СТР с ДФК многоцелевой КС с тепловыделением ~30 кВт принимается схема насосного двухфазного контура с жидкостной петлей разработки РКК «Энергия».

На основании проведенного анализа и выбора варианта конструкций необходимо сделать вывод, что при тепловыделении свыше 10 кВт, использование двухфазного контура становится однозначно более выгодным при оптимизации массоэнергетических характеристик космического аппарата.

### Библиографический список

1. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе : монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков и др. ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Кишкина ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – 234 с.
2. Шилкин О.В., Кишкин А.А., Зуев А.А., Делков А.В., Лавров Н.А. Проектирование системы пассивного охлаждения бортового комплекса космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.
3. ANALYSIS OF THE KEY DESIGN FEATURES OF LOW-POWER TURBINES FOR ELECTRICITY GENERATION *Kishkin A.A., Shevchenko Yu.N., Delkov A.V.* В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 62030.

### References

1. Rankin's organic cycle in an autonomous thermal power system: a monograph / A. A. Kishkin, O. V. Shilkin, A.V. Delkov et al.; edited by Dr. of Technical Sciences, prof. A. A. Kishkin; SibGU named after M. F. Reshetnev. – Krasnoyarsk, 2019. – 234 p.
2. Shilkin O.V., Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Lavrov N.A. Design of the passive cooling system of the onboard complex of the spacecraft // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2021. Vol. 28. No. 2. pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.
3. ANALYSIS OF THE KEY DESIGN FEATURES OF LOW-POWER TURBINES FOR ELECTRICITY GENERATION *Kishkin A.A., Shevchenko Yu.N., Delkov A.V.* In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnodar, Russia, 2020. p. 62030.

© Шилкин О. В., Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Делков А. В., 2023

УДК 629.785

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ВАРИАНТОВ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ ТЕМПОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

О. В. Шилкин<sup>1</sup>, Ю. Н. Шевченко<sup>2</sup>, А. А. Кишкин<sup>2</sup>, А. В. Делков<sup>2</sup>, М. У. Абдуллаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: spsp99@mail.ru

*В данной работе выполнен обзор по основным производителям и разработчикам космических аппаратов, использующих двухфазную систему терморегулирования. Определены основные преимущества двухфазного контура, представлены энергетические характеристики проектов имеющих значительное снижение энергопотребление системы терморегулирования на собственные нужды.*

*Ключевые слова: космический аппарат, система терморегулирования, масса системы терморегулирования, тепловой режим космического аппарата, теплообменник конденсатор, теплообменник испаритель.*

## OVERVIEW OF EXISTING VARIANTS OF TWO-PHASE SPACECRAFT TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS

O. V. Shilkin<sup>1</sup>, Yu. N. Shevchenko<sup>2</sup>, A. A. Kishkin<sup>2</sup>, A.V. Delkov<sup>2</sup>, M. U. Abdullayev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: spsp99@mail.ru

*Based on the review of the design of two-phase thermal control systems (TDS), a certain systematization of the design according to four types is proposed. The main structural elements are marked: heat exchangers, contour superchargers, both electromechanical and capillary pumps, thermal interfaces and contour pipelines.*

*Keywords: spacecraft, contour superchargers, capillary pumps, jet pumps, temperature control system, thermal regime of the spacecraft.*

При увеличении мощности тепловыделений на борту КА и необходимых расстояний теплопереноса существенными преимуществами по сравнению с однофазными имеют системы терморегулирования с двухфазными контурами теплопереноса. В таких контурах тепло аккумулируется и переносится в виде скрытой теплоты парообразования. Это позволяет существенно снизить расход теплоносителя, уменьшить затраты на его прокачку. Преимуществами двухфазного контура также являются:

- высокие коэффициенты теплоотдачи, реализуемые при кипении и конденсации теплоносителя;
- простота термостабилизации участков сбора и сброса теплоты;
- простота пассивного способа регулирования температуры в контуре и другие [1].

В итоге масса системы терморегулирования (СТР) (с учетом массы заправляемого теплоносителя) и ее энергопотребление могут быть существенно снижены. По оценкам, выполненным при проектировании, использование двухфазного теплоносителя позволяет снизить массу СТР мощностью до 30 кВт при расстоянии теплопереноса ~50 м примерно в 2 раза, а энергопотребление системы на собственные нужды на порядок. При тепловыделении свыше 10 кВт обеспечение теплового режима

КА с использованием ДФК становится практически безальтернативным (однозначно более выгодным с точки зрения энергетических затрат).

В нашей стране интенсивность исследований и объемы их финансирования существенно возросли в начале 1990-х г.г. при проведении проектных и экспериментальных работ по созданию Централизованной системы теплоотвода (ЦСТО) на основе ДФК для РС МКС. Хотя основные принципы построения ДФК были к этому времени уже сформулированы, в этот период было развернуто широкое взаимодействие ряда научных и заводских организаций по выбору оптимальных конструкций агрегатов, их изготовлению, созданию экспериментальных контуров ДФК на лабораторных стендах, разработке методик наземной отработки как отдельных агрегатов, так и ДФК в целом [2].

В РКК «Энергия» были разработаны чертежи и изготовлены опытные образцы основных агрегатов ДФК для экспериментальной отработки. В центре Келдыша разработан и создан мощный аммиачный стенд, который является аналогом ЦСТО РС МКС и содержит основные агрегаты ДФК: гидроаккумулятор с тепловым регулированием, теплообменники – конденсаторы, теплообменники – испарители, электромеханический насос, клапанно-запорную арматуру, электронагреватели, измерительную систему. Основное отличие стенда позволило отобразить не только тепловые, но и химико-технологические вопросы применения аммиака особой чистоты. Были заложены основы летнего эксперимента по исследованию ДФК, который был выполнен в июле-сентябре 1999 г.

В ХАИ (г. Харьков) создана разветвленная экспериментальная база для отработки ДФК на модельном теплоносителе. На этой базе проведена оценка различных вариантов конструкции агрегатов двухфазного контура.

Программно-математическое обеспечение для расчета характеристик ЦСТО с центральным радиационным теплообменником (ЦРТ) в натуральных условиях полета станции разрабатывалось в ЦНИИМаш, математические модели отдельных агрегатов ДФК и необходимые расчеты выполнялись в РКК «Энергия», МГТУ им. Баумана, МЭИ, ИТМО (г. Минск).

Работы по созданию РС МКС в первоначальной конфигурации, включающей научно-экспериментальную платформу (НЭП) и четыре исследовательских модуля с использованием для обеспечения теплового режима ЦСТО, были приостановлены в 2002 году в связи с недостаточным объемом финансирования запланированной программы.

Однако, внедрение ДФК в СТР перспективных КА с большим тепловыделением остается до настоящего времени актуальной задачей [3].

Вместе с тем, при разработке СТР с ДФК возникает ряд проблем, решение которых требует выполнения большего объема расчетно-теоретических, конструкторских, технологических, материаловедческих и экспериментальных работ по подтверждению работоспособности ДФК и его элементов в стендовых и натуральных условиях.

### Библиографический список

1. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
2. Кишкин А.А. Проектная оптимизация теплотехнических систем, работающих по замкнутому контуру / Кишкин А.А., Делков А.В., Зуев А.А., Ходенков А.А. // Вестник СибГАУ им.М. Ф. Решетнева. Выпуск 5(45); Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2012. с.34-38.
3. Шилкин О.В., Кишкин А.А., Зуев А.А., Делков А.В., Лавров Н.А. Проектирование системы пассивного охлаждения бортового комплекса космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.

### References

1. Yemtsev B.T. Technical hydromechanics. M.: Mechanical Engineering, 1987. – 440 p.
2. Kishkin A.A. Design optimization of thermal engineering systems operating in a closed loop / Kishkin A.A., Delkov A.V., Zuev A.A., Khodenkov A.A. // Bulletin of SibGAU named after M. F. Reshetnev. Issue 5(45); Sib. gos. aerospace. un-T. – Krasnoyarsk, 2012. pp.34-38.
3. Shilkin O.V., Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Lavrov N.A. Design of the passive cooling system of the onboard complex of the spacecraft // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2021. Vol. 28. No. 2. pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106 .



**Секция**  
**«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»**

УДК 621.4

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ С ТЕПЛООБМЕНОМ НА НАЧАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ КАНАЛОВ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТНА ЖРД

А. А. Арнгольд<sup>1</sup>, А. А. Зуев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: Arngoldanna@mail.ru

*Уточнена методика определения теплового потока, переносимого через поперечное сечение, с учётом особенностей нестabilизированного течения жидких рабочих тел на начальных участках каналов проточных частей ТНА ЖРД.*

*Ключевые слова: нестabilизированное течение, температурный пограничный слой, динамический пограничный слой, уравнение теплового потока.*

## FEATURES OF THE FLOW WITH HEAT EXCHANGE IN THE INITIAL SECTIONS CHANNELS OF THE FLOW PARTS OF THE TURBOPUMP UNIT OF THE LIQUID ROCKET ENGINE

A. A. Arngold<sup>1</sup>, A. A. Zuev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”

29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: Arngoldanna@mail.ru

*The method of determining the heat flow transferred through the cross-section is clarified, taking into account the peculiarities of the unstabilized flow of liquid working bodies in the initial sections of the channels of the flow parts of the turbopump unit of a liquid rocket engine.*

*Keywords: unstabilized flow, temperature boundary layer, dynamic boundary layer, heat flow equation.*

**Введение.** Методикам расчета, моделированию и проектированию центробежных насосов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) посвящено большое количество научно-исследовательских работ [1-8].

В настоящее время к двигательным установкам (ДУ) летательных аппаратов (ЛА) предъявляются повышенные требования по обеспечению максимальной эффективности. Современные ТНА ЖРД достигают частоту вращения до 100 000 – 120 000 об/мин. Достижение высоких энергетических параметров зависит от совершенства преобразования энергии рабочего тела в проточных частях и вспомогательных трактах насосов, поэтому при проектировании современных ТНА требуется учитывать теплофизические процессы, протекающие в гидравлических трактах турбомашин.

В связи с этим, исследования течений с учетом теплоотдачи в элементах ТНА, на которые влияют такие факторы как расход, утечки через уплотнения, распределение давления в полостях ТНА, наличие сложных криволинейных поверхностей вращения с учетом поперечного градиента давления, теплообмен между элементами конструкции и потоками рабочих тел – являются актуальными.

**Постановка задачи.** Известные методики расчёта центробежных насосов не учитывают нестabilизированные течения на начальных участках в каналах гидравлического тракта ТНА. Для повыше-

ния достоверности расчета энергетических характеристик требуется уточнение используемых расчётных зависимостей.

**Теория.** При ламинарном течении рабочего тела в каналах гидравлического тракта ТНА перенос теплоты осуществляется путем теплопроводности по нормали к стенке и конвективным переносом в продольном направлении. При турбулентном режиме движения, перенос теплоты внутри рабочего тела осуществляется в основном путем перемешивания, при этом, процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению ядра потока температура практически постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается лишь внутри пограничного слоя [7].

Тепловой пограничный слой образуется на входе в канал, у поверхности. Его толщина постепенно увеличивается в направлении движения потока. На некотором расстоянии от входа  $L_{nt}$ , тепловые пограничные слои смыкаются, и в процессе теплообмена далее участвует весь поток.

С учётом аппроксимации распределения температурного и динамического пограничных слоёв степенными функциями получены уравнения теплового потока для начальных участков нестабилизированного течения для внутренней задачи течения с учётом теплообмена при  $Pr > 1$  для участков:

– термически и динамически нестабилизированного течения:

$$Q = \int_0^x 2\pi\rho C_p U (T_{\delta_t} - T_0) \left( \frac{(R - \delta)^2}{2} + \frac{m\delta(R - \delta + 2mR - m\delta)}{2m^2 + 3m + 1} - \frac{m\delta_t^{\frac{m+1}{m}}(R - \delta_t + 2mR - m\delta_t)}{\delta_t^{\frac{1}{m}}(2m^2 + 3m + 1)} + \frac{m\delta_t^{\frac{m+1}{m}}}{\delta_t^{\frac{1}{m}}} \left( \frac{R}{m+2} - \frac{\delta_t}{2m+2} \right) \right) dx;$$

– термически нестабилизированного, динамически стабилизированного течения:

$$Q = \int_0^x 2\pi\rho C_p U (T_{\delta_t} - T_0) \left( \frac{m \left( mR^{\frac{2m+1}{m}} + \delta_t^{\frac{2m+1}{m}} + m\delta_t^{\frac{2m+1}{m}} - R\delta_t^{\frac{m+1}{m}} - 2mR\delta_t^{\frac{m+1}{m}} \right)}{R^{\frac{1}{m}}(2m^2 + 3m + 1)} + \frac{m\delta_t^{\frac{m+1}{m}}(2mR + 2R - m\delta_t - 2\delta_t)}{R^{\frac{1}{m}}(2m^2 + 6m + 4)} \right) dx;$$

– термически и динамически стабилизированного течения:

$$Q = \int_0^x 2\pi\rho C_p U (T_{\delta_t} - T_0) R \left( \frac{mR}{m+2} - \frac{mR}{2m+2} \right) dx.$$

**Выводы.** Определён тепловой поток с учетом толщины пограничного слоя, переносимый через поперечное сечение, на начальных участках термически и динамически нестабилизированного течения; термически нестабилизированного, динамически стабилизированного течения; термически и динамически стабилизированного течения.

#### Библиографические ссылки

1. Бобков А.В., Цветков О.Е. Повышение напорных качеств центробежного насоса системы терморегулирования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 10. С. 110.
2. Совершенствование агрегатов для транспортировки тепла в космических аппаратах / В.В. Двирный, Г.Г. Крушенко, В.В. Голованова и др. // Исследования наукограда. 2016. № 3-4 (18). С. 12-16.

3. The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps / Zuev A.A., Nazarov V.P., Arngold A.A., Petrov I.M. // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20. № 2. С. 219-227. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-219-227
4. Zuev, A. A., Nazarov, V. P., Zhuikov, D. A., Tolstopyatov, M. I., & Savelyeva, M. V. (2020). Resistance moment of a rotation surface of liquid rocket engines turbomachines elements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 862, 022032. doi:10.1088/1757-899x/862/2/022032
5. Расчет полей линий уровня коэффициента быстроходности центробежного нагнетателя космического аппарата / А.В. Бобков, Н.И. Каталажнова, А.А. Качалов // Успехи современного естествознания. 2004. № 4. С. 50-51.
6. Кейс В. М. Конвективный тепло- и массообмен : пер. с англ. М.: Энергия, 1972. 448 с.
7. Михеев М.А., Михеева И.М., Основы теплопередачи. Изд.2. М. Энергия. 1977. 344с.
8. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. пер. с нем. М. : изд. «Наука», 1969. 744 с.

### References

1. Bobkov A.V., Tsvetkov E.O. [Improving the pressure qualities of the centrifugal pump thermal control system]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2012, no. 10, p. 110 (In Russ.).
2. Dvirnyy V.V., Krushenko G.G., Golovanova V.V., Dvirnyy G.V., Petyayeva N.N., Kirianova K.A. [Improvement of units for heat transportation in spacecraft]. Issledovaniya naukoграда. 2016, no. 3-4 (18), p. 12-16 (In Russ.).
3. Zuev A.A., Nazarov V.P., Arngold A.A., Petrov I.M. [The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps]. Siberian Journal of Science and Technology. 2019, Vol. 20, no. 2, p. 219–227 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-219-227
4. Zuev, A. A., Nazarov, V. P., Zhuikov, D. A., Tolstopyatov, M. I., & Savelyeva, M. V. (2020). Resistance moment of a rotation surface of liquid rocket engines turbomachines elements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 862, 022032. doi:10.1088/1757-899x/862/2/022032
5. Bobkov A.V., Katalazhnova N.I., Kachalov A.A. [TCalculation of field lines ratio specific speed centrifugal blower spacecraft]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2004, no. 4, p. 50-51 (In Russ.).
6. Case V. M. Convective heat and mass transfer: trans. from English M.: Energiya, 1972. 448 p.
7. Mikheev M.A., Mikheeva I.M., Fundamentals of heat transfer. Ed.2. M. Energy. 1977. 344 p.
8. Schlichting, G. Theory of the boundary layer / G. Schlichting. trans. from German. M.: ed. "Science", 1969. 744 p.

© Арнольд А. А., Зуев А. А., 2023

УДК 621.45.018.2

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СЛИВА В ПРОЦЕССЕ ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ РАСХОДА НА ОГНЕВОМ СТЕНДЕ**

А. М. Бегишев

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail alex-beg95@mail.ru

*Автором в работе рассмотрены особенности процесса градуировки турбинных расходомеров на испытательных стендах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), проведен подбор оптимальных начальных условий для первого слива в процессе градуировки на компонентах несимметричный диметилгидразин (НДМГ) и азотный тетраоксид (АТ). Проведено оформление результатов в виде графиков.*

*Ключевые слова: испытательный стенд ЖРД, турбинный преобразователь расхода, градуировка.*

## **DETERMINATION OF THE OPTIMAL INITIAL CONDITIONS OF DRAIN IN THE PROCESS OF CALIBRATION OF FLOW SENSORS ON THE FIRE STAND**

A. M. Begishev

JSC «Krasnoyarsk Machine Building Plant»  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail alex-beg95@mail.ru

*The author in the paper considers the features of the process of calibrating turbine flowmeters on test benches for liquid rocket engines (LRE), selects the optimal initial conditions for the first drain in the calibration process on the components unsymmetrical dimethylhydrazine and nitrogen tetroxide. The results were presented in the form of graphs.*

*Keywords: LRE test bench, turbine flow converter, calibration.*

Как и значение тяги, развиваемой ЖРД на установившихся режимах, значения расходов компонентов на этих режимах являются исходной информацией для расчета основных характеристик ЖРД. Важное значение имеет также определение характера изменения расхода компонентов в магистралях ДУ на переходных режимах работы ЖРД. Широкое распространение в практике огневых испытаний ЖРД получили турбинные преобразователи расхода, в силу своей простоты и надежности [1].

Преобразователь расхода турбинный - это агрегат, предназначенный для выдачи информации об объёмном расходе измеряемой жидкости [2]. Чувствительным элементом данного агрегата является винтовая гидрометрическая турбина. Турбинные преобразователи расхода могут быть с аксиальной и с тангенциальной турбиной. У первых лопасти расположены по винтовой линии, а ось совпадает с осью потока. У вторых ось перпендикулярна к направлению потока, а прямые лопасти расположены радиально по отношению к оси. Данный агрегат представляет собой участок трубопровода, т.е. корпус расходомера с помощью разъемного соединения присоединяется с трубопроводами, образуя единую топливную магистраль. Поток попадает из трубопровода в полость расходомера через установленный на входе струевыпрямитель, его функция выровнять поток, тем самым уменьшив погрешности в работе расходомера. Затем поток, попадая на лопасти турбины, приводит её во вращение, после чего датчик, установленный в составе расходомера, с помощью индукции преобразуют частоту вращения вертушки преобразователя в электрические импульсы. Во время вращения вертушки, при проходе лопастей или других ее элементов из ферромагнитного материала мимо катушки изменяется сопротивление ее магнитной цепи, а значит, и ее индуктивность. Это вызывает периодическое изме-

нение силы тока в обмотке катушки и соответствующее изменение выходного напряжения. При этом на выходе получается высокочастотный сигнал, модулированный по амплитуде. После этого производится пересчет электрических импульсов, поступающих от датчика в стандартные (именованные) единицы объемного расхода [3].

Для улучшения метрологических свойств турбинных преобразователей принимают меры по обеспечению стабильности их градуировочных характеристик, которые выражаются в установке преобразователей в определенном прямолинейном участке расходного стендового трубопровода, периодической аттестацией преобразователей при градуировке последних на компонентах ракетного топлива [4]. Для процесса градуировки производится подготовка стендовых систем, в которую входит установка специальных технологических закольцовок, позволяющих произвести слив компонента из расходных баков в приемные, используя при этом участок расходной магистрали, на которых установлены турбинные расходомеры. При каждом сливе наддув расходных баков осуществляется алгоритмом, который позволяет поддерживать определенную частоту вращения турбин преобразователей. На основании показаний зондовых уровнемеров, установленных в расходных и приемных баках, производится определение объемного расхода компонентов топлива на заданной частоте показания расходомера. Слив на каждой частоте повторяется несколько раз, вследствие чего периодически производится перезаправка компонента из приемных баков обратно в расходные. Для наддува расходных баков применяется газообразный азот, а с приемных баков осуществляется дренажирование давления на дожигатель, где производится сжигание отработанных газов.

Начальными условиями перед градуировочным сливом являются: требуемая частота вращения расходомеров, уровень компонентов в расходных и приемных баках, давление газовой подушки в расходных и приемных баках, давление наддува расходных баков. В соответствии с технологическим процессом градуировки датчиков расхода первым производится оценочный слив, по результатам которого оценивают правильность выбранных начальных условий слива. Поскольку при неоптимальных условиях слив компонента может начинаться с большей частотой, в связи, с чем запись показаний слива не будут производиться до тех пор, пока показания расходомера не достигнут градуировочных пределов.

Обратный сценарий заключается в том, случае, когда слив начинается с меньшей, нежели чем положено частотой, в результате чего при срабатывании алгоритма наддува возможна чрезмерно резкая подработка линий наддува, которая влечет за собой увеличение времени выхода на режим градуировочной частоты. Таким образом, оптимальные начальные условия перед градуировочным сливом необходимо рационально подобрать таким образом, чтобы в начале слива обеспечить показания расходомеров максимально близкие к требуемым по заданию [5].

Для решения данной задачи проанализированы показания параметров процесса градуировки расходомеров на НДМГ и АТ. Справедливо замечено, что в процессе поддержания работы расходомеров на требуемой частоте между нижними точками расходных и приемных баков, находящихся на одном уровне, образуется определенный постоянный перепад давления. Зная значение перепада давления для каждой из градуировочных частот можно определить начальные условия таким образом, чтобы в зависимости от уровней компонентов в баках подобрать расчетное давление газовой подушки, как в расходном, так и в приемном баке. Уровень компонента необходимо учитывать, так как на перепад давления измеренного в нижних точках баков, влияет статическое давление столба жидкости. Для этого произведены замеры по значению статического давления столба жидкости с учетом показаний зондов уровнемеров эксплуатируемых баков. Как результат работы получены графики оптимальных условий для различных частот, которые можно использовать работнику, ведущему работы по градуировке датчиков расхода на огневом стенде.

### Библиографические ссылки

1. Испытание жидкостных ракетных двигателей / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.Я. Левин и др. М.: Машиностроение, 1981. 199 с.
2. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей: учеб. пособие / В.Г. Яцуенко, В.П. Назаров, А.И. Коломенцев ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учебник / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др. Высш. школа, 1983. 703 с.

4. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: монография [Электронный ресурс] / А.Г. Галеев, В.Н. Иванов, А.В. Катенин и др. Киров: МЦНИП, 2015. 436 с.

5. ГОСТ 8.510-2002 «ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости. Дата введения 01.01.2004 URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032104> (дата обращения: 09.08.2022). Текст: электронный.

### References

1. Zhukovskij A.E., Kondrusev V.S., Levin V.YA. *Isпытanie zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* [Test of liquid rocket engines]. Mashinostroenie, 1981, 199 p.

2. YAcunenکو V.G., Nazarov V.P., Kolomencev A.I. *Stendovye ispytaniya zhidkostnyh raketnyh dvigatelej: ucheb. posobie* [Bench tests of liquid rocket engines: a training manual]. Sib. gos. aerokosmich. univ.; Mosk. aviac. univ. Krasnoyarsk, 2016, 248 p.

3. Vasil'ev A.P., Kudryavcev V.M., Kuznecov V.A. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnyh raketnyh dvigatelej: uchebник* [Fundamentals of the theory and calculation of liquid rocket engines]. Vyssh. shkola, 1983, 703 p.

4. Galeev A.G., Ivanov V.N., Katenin A.V. *Metodologiya ehksperimental'noj otrabotki ZHRD i DU, osnovy provedeniya ispytanij i ustrojstva ispytatel'nyh stendov: monografiya* [Methodology of experimental testing testing of LRE, the basics of testing and device test stand: a monograph]. Kirov: MCNIP, 2015, 436 p.

5. GSI. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Gosudarstvennaya poverochnaya skhema dlya sredstv izmerenij ob"ema i massy zhidkosti. date of introduction 2004-01-01 URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032104> (date of access: 09.08.2022). Text: electronic.

© Бегишев А. М., 2023

УДК 629.7.036.54

## РЕСУРСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПОРОХОВОГО АККУМУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ

С. Г. Бредихин, Е. В. Блинков, В. М. Самошкин

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: serega\_best121289@mail.ru

*В статье рассмотрены экспериментальные работы, направленные на подтверждение повторного использования материальной части после испытаний аккумулятора давления*

*Ключевые слова: материальная часть, испытания, экспериментальная работа, анализ, корректировка конструкторской документации*

## RESOURCE USE OF THE MATERIAL PART OF PRESSURE ACCUMULATOR

S. G. Bredikhin, E. V. Blinkov, V. M. Samoshkin

JSC «Krasnoyarsk Machine Building Plant»  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: serega\_best121289@mail.ru

*The article discusses experimental work aimed at confirming the reuse of the material part after testing a pressure accumulator*

*Keywords: material part, tests, experimental work, analysis, adjustment of design documentation*

В области разработки и проектирования изделий ракетно-космической техники, работающих на твердом топливе, зачастую при опытно-конструкторских работах в части разработки конструкторской документации, изготовления материальной части (опытных образцов) и испытаний отсутствуют экспериментальные работы в виде натурных испытаний на ресурсное использование материальной части, что не позволяет разработчикам изделия, полагаясь лишь на теоретические знания и модельные испытания, подтвердить возможность повторного использования материальной части после испытаний, что приводит к дополнительным затратам [1].

В частности, рассмотрим ресурсное использование серийно изготавливаемой материальной части порохового аккумулятора давления (ПАД) при проведении защиты элементов снаряжения согласно конструкторской документации используются вновь изготовленные изделия разового применения, что в свою очередь сопровождается дополнительными материальными, временными и трудовыми затратами.

Корпусные детали рассматриваемого ПАД изготавливаются из стали 03X11H10M2-ВД с последующей механической обработкой, сборка выполнена с помощью разъемных и сварных соединений, и предназначены для проведения приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) элементов снаряжения [2].

Для оптимизации средств на материальные, трудовые и временные затраты изготовления серийных изделий, в частности проведения ПСИ элементов снаряжения были проведены экспериментальные работы, направленные на подтверждение необходимых характеристик ПАД после огневого стендового испытания (ОСИ) [3].

Была проведена экспериментальная работа на подтверждение прочностных характеристик корпусных деталей ПАД после проведения ПСИ зарядов и воспламенителей, в следующем объеме:

- материальная часть после проведения ОСИ подвергнута нейтрализации и дефектации для выявления повреждений конструкции изделия;

- испытания на прочность и герметичность в соответствии с требованиями КД повторно используемые корпусные детали;

Положительные результаты экспериментальной работы позволили выполнить дополнительный анализ и корректировку КД.

Анализ результатов экспериментальных работ в виде натурных испытаний позволил ввести в КД двукратное использование корпусной материальной части ПАД для проведения ПСИ элементов снаряжения, что в значительной мере позволило сэкономить материальные, трудовые и временные затраты.

Похожие результаты показывает анализ экспериментальных работ в виде натурных испытаний, где положительные результаты первой и второй части экспериментальной работы были использованы для анализа и корректировки КД и позволили ввести в КД двукратное использование корпусной материальной части твердотопливных изделий для проведения ПСОСИ элементов снаряжения, что в значительной мере позволит сэкономить материальные, трудовые и временные затраты.

В результате работы подтверждено, что в дополнение к теоретическим данным и модельным испытаниям изделий излишние материальные, временные и трудовые затраты возможно избежать путем дополнительных натурных ресурсных испытаний изделий на этапе опытно-конструкторских работ, проводимых разработчиками конструкторской документации изделий.

### **Библиографические ссылки**

1. Гардымов Г.П., Парфенов Б.А. Технология ракетостроения. СПб: Специальная литература, 1997. 320 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. Т. 1. М: Машиностроение, 1980 728 с.
3. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. Т. 1. М: Машиностроение, 1968 535 с.

### **References**

1. Гардымов Г.П., Парфенов Б.А. Технология ракетостроения. СПб: Специальная литература., 1997, 320 p.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. Т. 1. М: Машиностроение, 1980, 728 p.
3. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. Т. 1. М: Машиностроение, 1968, 535 p.

© Бредихин С. Г., Блинков Е. В., Самошкин В. М., 2023

УДК 629.76:004.032.26

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. В. Власенко, А. И. Косырева

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru

*В данной работе рассматриваются возможность применения нейронных сетей при создании изделий ракетно-космической техники (РКТ). Благодаря современному развитию технологий и вычислительным возможностям техники, человечество создает все более высокоразвитый искусственный интеллект. Наиболее совершенный его вид, который способен к самообучению — нейронная сеть, перспектива практического использования которой в процессе производства РКТ рассматривается в данной статье.*

*Ключевые слова: нейронные сети, нейросети, искусственный интеллект, нейросети в РКТ, САПР с нейронной сетью, нейросети в производстве.*

## APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN THE MANUFACTURING PROCESS OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

A. V. Vlasenko, A. I. Kosyрева

JSC «Krasnoyarsk Machine Building Plant»  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru

*In this paper, we consider the possibility of using neural networks in the process of creating products for the rocket and space industry. Thanks to the modern development of technology and the computing capabilities of technology, humanity is creating an increasingly highly developed artificial intelligence. Its most perfect type, which is capable of self-learning, is a neural network, the prospect of practical use of which in the production process of RST is considered in this article.*

*Keywords: neural networks, neural networks, artificial intelligence, neural networks in RKT, CAD with a neural network, neural networks in production.*

На данный момент применение искусственного интеллекта (ИИ) относится к перспективнейшим направлениям, так как его использование позволяет быстро и качественно выполнить объемную, трудоемкую и сложную работу, что делает его востребованным для использования практически во всех сферах человеческой жизнедеятельности.

ИИ создается по биологическим принципам, используя при этом ряд допущений, основываясь на множестве простейших процессов с большим количеством связей и взаимодействий.

Направлением, относящимся к ИИ, позволяющим систематизировать информацию, распознать скрытые закономерности в необработанных данных, провести их группировку и классификацию, называется нейронными сетями (нейросетями). Они состоят из множества слоев, в каждом из которых содержатся узлы, взаимодействующие со всеми узлами сети и имеющие свой «вес», который определяет силу передаваемого сигнала.

Принцип работы таких сетей заключается в параллельной обработке данных и постоянном сравнении их с результатом обработки на каждом из этапов.

Важнейшая особенность нейронной сети – способность развиваться, подобно человеческому мозгу, настраивая структуру связи между нейронами и влияя на синоптический вес, что позволяет улуч-

шать эффективность решения постеленной задачи. Процесс развития начинается с размеченного набора данных с очевидными закономерностями, а затем полученная информация используется для самообучения и достижения результата. Увеличивая их число и набираясь таким образом «опытом», нейросеть становится более продуктивной и эффективной.

Нейронные сети расширяют возможности и ускоряют процесс замещения человеческого разума в процессах прогнозирования и планирования производства, добиваясь уровня показателей эффективности, которых невозможно достичь без их использования, упрощают управление робототехникой.

Текущий уровень технологий уже позволяет создавать системы автоматизированного проектирования (САПР) с применением нейронных сетей, которые способны на основании исходных данных выполнить полный комплект КД и ЭД [1]. К таким исходным данным относятся не только характеристики, особенности и свойства продукции, которую необходимо производить, но и особенности технологического оснащения, производственных мощностей, материально-технического снабжения, принципы экономии средств и времени, технологичности, ремонтпригодности конструкции и т. д.

Основным ограничивающим фактором создания таких систем является сложность их производства.

Применяемые на данный момент САПР, не использующие принципов нейронных сетей, позволяют хоть и улучшить эффективность работы инженеров, но как правило обладают узкоспециализированной направленностью, и являются «инструментом» в руках квалифицированных специалистов. При этом результат их работы зачастую зависит от профессиональной компетенции людей и их опыта, а также в определенной степени и от их креатива. Применение ИИ с возможностью саморазвития позволяет разрешить многие задачи, превращая САПР не столько в «инструмент», сколько в систему, способную заменить и взять на себя задачи, которые ранее всегда выполнялись посредством человеческого труда.

Нейронные сети могут решить еще одну сложнейшую задачу – соответствие создаваемой конструкторской и технологической документации нормативным документам (НД): государственным стандартам (ГОСТ), отраслевым стандартам (ОСТ), стандартам предприятия (СТП), стандартам научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений (СТО)). НД насчитывается огромное количество, а информация, содержащаяся в них, обширна, включает в себя многие противоречия, и не способна быть усвоена человеческим мозгом в полной мере, ввиду ограниченности его ресурсов. А вот ИИ, обладающий большими способностями к усвоению информации, способен создать четкую систему НД, более близкую к совершенной, чем создаваемую мозгом человека, и регламентирующую параметры продукции и условия производства.

Еще одной проблемой, с легкостью решаемой при помощи ИИ, является материально-техническое снабжение, а именно необходимость обеспечения определенным видом материальных и технических ресурсов в сроки и в объемах, необходимых для бесперебойного осуществления производственной деятельности.

Нейросеть может осуществлять контроль состояния как выпускаемой продукции, так и технологического оборудования, а также давать высококачественный прогноз по его износу и необходимости обслуживания. Например, они способны визуальным способом идентифицировать поверхностные дефекты (царапины, забоины) микроразмеров, что не под силу ни одному человеческому глазу, а учитывая огромную совокупность других характеристик объектов исследования (электромагнитные, акустические, весовые и т. д.), которые так же могут учитываться в процессе, возможности по выявлению дефектов возрастают многократно[2].

Также, красноярские сотрудники университетов СФУ и СибГУ имени Решетнева разработали программно-аппаратный комплекс, который в режиме реального времени автоматически контролирует и корректирует все процессы сварки и пайки трубопроводов[3].

Нейронные сети не лишены и недостатков, к которым можно отнести сложность настройки и обучения при многофакторной работе, что приводит к высоким временным и стоимостным затратам, ограниченность в интерпретации получаемых данных.

Столь быстрое развитие нейронных сетей несет не только позитивный эффект, избавляя человечество от рутинной работы, снижая издержки и улучшая производительность, но также и приводит к уменьшению необходимости использования человеческого труда для решения тех или иных задач, что делает невостребованными многие категории профессий, оставляя людей без работы. Однако данный процесс неизбежен и происходит повсеместно: многие профессии становятся невостребован-

ными, вынуждая людей переквалифицироваться; а увеличение производительности труда, в целом позитивно влияет на человечество.

### Библиографические ссылки

1. ЭНЭКА. Инженерно-консалтинговая группа компаний. «Нейронные сети в проектировании. Основы и применение.» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eneca.by/novosti/proektirovanie-inzhiniring/neyronnye-seti-v-proektirovanii-osnovy-i-primenenie>.
2. Upperator. Нейросети в промышленности. «Нейросети в управлении производственным процессом» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://upperator.ru/chip\\_production](https://upperator.ru/chip_production)
3. Dprom.online. Портал для недропользователей. «В Красноярске создали нейронный аппарат для ремонта нефтепроводов.» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dprom.online/oilngas/v-krasnoyarske-sozdali-nejronnyj-apparat-dlya-remonta-nefteprovodov/>

### References

1. ENEKA. Inzhenerno-konsaltingovaya gruppa kompanij. «Nejronnye seti v proektirovanii. Osnovy i primenenie.» [ ENECA. Engineering and consulting group of companies. «Neural networks in design. Fundamentals and application.»] [Electronic resource]. Access mode: <https://eneca.by/novosti/proektirovanie-inzhiniring/neyronnye-seti-v-proektirovanii-osnovy-i-primenenie>.
2. Upperator. Nejroseti v promyshlennosti. «Nejroseti v upravlenii proizvodstvennym processom» [Upperizer. Neural networks in industry. "Neural networks in production process control"] [Electronic resource]. Access mode: [https://upperator.ru/chip\\_production](https://upperator.ru/chip_production)
3. Dprom.online. Portal dlya nedropol'zovatelej. «V Krasnoyarske sozdali nejronnyj apparat dlya remonta nefteprovodov.» [Dprom.online. Portal for subsoil users. "In Krasnoyarsk created a neural apparatus for the repair of oil pipelines." ] [Electronic resource]. Access mode: <https://dprom.online/oilngas/v-krasnoyarske-sozdali-nejronnyj-apparat-dlya-remonta-nefteprovodov/>

© Власенко А. В., Косырева А. И., 2023

УДК 621.9.08

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ СПОСОБА  
ПРОГРАММНОЙ КОРРЕКЦИИ УПРУГОГО ЗАЗОРА  
В СИСТЕМЕ СЛЕЖЕНИЯ ПО ОСТАТОЧНОЙ ТОЛЩИНЕ ПОЛОТНА**

С. А. Жежера

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: sergezhezhera@gmail.com

*В работе представлены сведения о возможности применения способа программной коррекции (в режиме реального времени) упругого зазора в системе слежения с целью повышения точности обработки остаточной толщины полотна цилиндрических обечаек. Проработана возможность экспериментальной апробации с применением необходимого технологического оборудования и оснастки.*

*Ключевые слова: программная коррекция, управляющая программа, остаточная толщина полотна, ультразвуковой толщиномер.*

**EXPERIMENTAL APPROBATION OF A WAY OF PROGRAM CORRECTION  
OF AN ELASTIC BACKLASH IN TRACKING SYSTEM ON THE RESIDUAL  
TO THICKNESS OF A CLOTH**

S. A. Zhezhera

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: sergezhezhera@gmail.com

*In work data on possibility of application of a way of program correction (in a mode of real time) an elastic backlash in system of tracking for the purpose of increase of accuracy of processing of a residual thickness of a cloth cylindrical obechaek are presented. Possibility of experimental approbation with application of the necessary process equipment and equipment is worked.*

*Keywords: the program correction, the operating program, a residual thickness of a cloth, ultrasonic tolshinomer.*

На этапе освоения нового изделия ключевым вопросом стало создание и изготовление технологического комплекса (технологическое оснащение + технологическое оборудование) в рамках ОКР, обеспечивающего изготовление цилиндрических обечаек, сферических днищ и конических корпусов с вафельным фоном с применением контактного электро-механического (станки ПФ262Ф4В-2ВФУ и ПФ522Ф4В-2ВФУ) и бесконтактного (станок ТМКБ.1.51.320.00.000) слежения за остаточной толщиной полотна.

В настоящее время на оборудовании, поставленном в рамках ОКР, основным методом слежения за остаточной толщиной является электро-механическое слежение за остаточной толщиной полотна.

Данный метод слежения позволяет более точно отслеживать геометрические отклонения, но из-за конструктивных особенностей оборудования (недостаточная жесткость) разнотолщинность полотна в некоторых случаях может достигать до 0,4мм, в связи с чем предлагается провести эксперимент по повышению точности обработки вафельного фона с программной коррекцией и промежуточным контролем [1-5].

### Описание эксперимента

Эксперимент заключается в апробации способа программной коррекции (в реальном времени) упругого зазора в системе слежения с целью повышения точности обработки по остаточному полотну. Программная коррекция осуществляется путем добавления дополнительного корректирующего сигнала  $V_{corr}$  к сигналу  $V$  датчика слежения за контуром. Коррекция осуществляется через команды управляющей программы. Необходимость введения коррекции обусловлена обнаруженным искажением сигнала  $V$  с датчика слежения за контуром в момент реверса.

#### Для эксперимента необходимо:

- 1) Цилиндрическая заготовка  $\varnothing=3000\text{мм}$ , выставленная для обработки на станке ПФ262Ф4В-2ВФУ или ПФ522Ф4В-2ВФУ или ТМКБ.1.51.320.00.00. Предполагается произвести обработку ячеек на технологическом припуске;
- 2) Портативный ультразвуковой толщиномер с абсолютной погрешностью измерения толщины  $\pm 0.03\text{ мм}$ . Планируется измерять толщины в диапазоне 14.5-18.5мм;
- 3) Управляющая программа обработки одного кармана 150x150мм **без коррекции** для цилиндрической заготовки  $\varnothing=3000\text{мм}$ ;
- 4) Управляющая программа обработки **с коррекцией** одного кармана 150x150мм для цилиндрической заготовки  $\varnothing=3000\text{ мм}$ .

### Описание эффекта искажения сигнала в датчике копировальной системы

Рассмотрим сигнал с датчика слежения за контуром  $V(t)$ , полученный при обмере задней стенки заготовки перед выполнением фрезерования пояса кармана. Данный сигнал записан при значении координаты  $Z=918.25$  по всему диапазону  $B=0\div 360^\circ$  (рис. 1а) путем вращения всей заготовки, при этом противопиндель с датчиком был подведен к задней стенке. На рис. 1а вертикальными линиями обозначены соответствующие карманы пояса №6. Выделим сигнал  $V(B)$ , соответствующий ячейке cell430, диапазон  $B=252.4\div 257.6^\circ$  (рис. 1б)

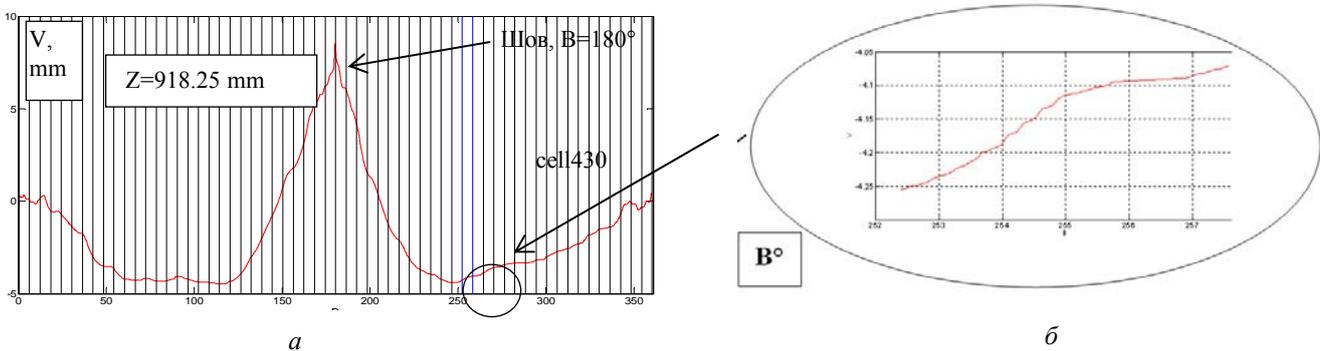


Рис. 1. Сигнал с датчика слежения за контуром  $V(t)$

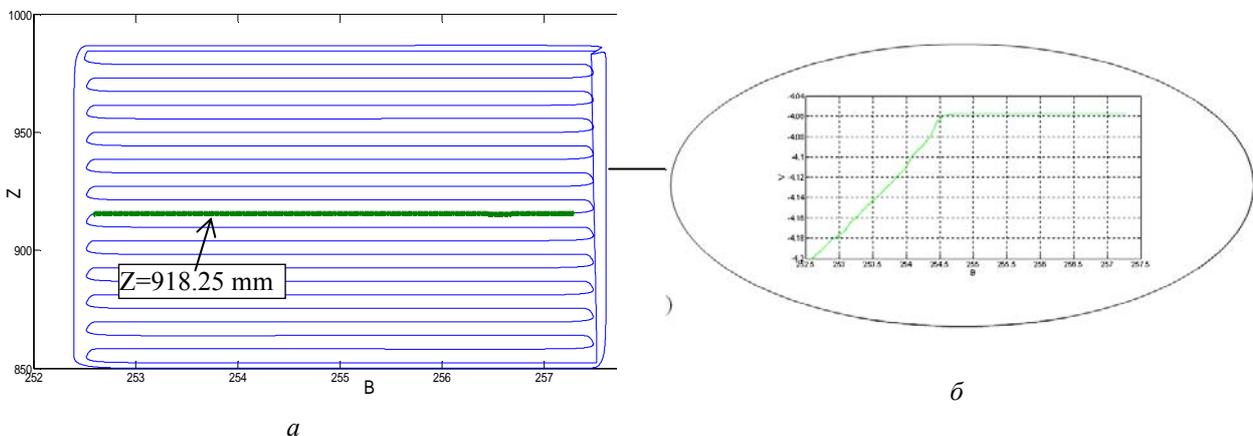


Рис. 2.  $V$  сигнал при обработке ячейки cell430 пояса №6 по траектории типа «зигзаг».

Рассмотрим теперь записанный с датчика слежения  $V$  сигнал при обработке ячейки cell430 пояса №6 по траектории типа «зигзаг» ( $F=3000$  мм/мин,  $S=10000$  об/мин, толщина снимаемого слоя  $b=1.7$  мм) на рис. 2, а. Здесь: синей кривой обозначена траектория движения инструмента и следящей опоры при обработке кармана, зеленой кривой обозначен участок траектории (строчка) при  $Z=918.25$ ,  $B=252.4 \div 257.6^\circ$ . На рис. 2б также приведен сигнал с датчика слежения за контуром  $V(B)$ , соответствующий зеленой «строчке» на рис. 2а.

Сопоставим сигналы  $V(B)$  с рис. 2б и рис. 1б для значений координат  $Z=918.25$ ,  $B=252.4 \div 257.6^\circ$  и получим графики, приведенные на рис. 3. Здесь зеленой кривой обозначен сигнал с датчика слежения за контуром  $V$ , полученный при проходе по траектории обработки, красной кривой обозначен сигнал с датчика слежения за контуром  $V$ , полученный при предварительном обмере заготовки. Видна заметная разница между формами сигнала.

Теперь посмотрим на сигнал с датчика слежения за контуром  $V$  для нескольких строчек при проходе по той же траектории «зигзаг» и совместим его с сигналом  $V$ , полученным предварительным обмером (рис. 4).

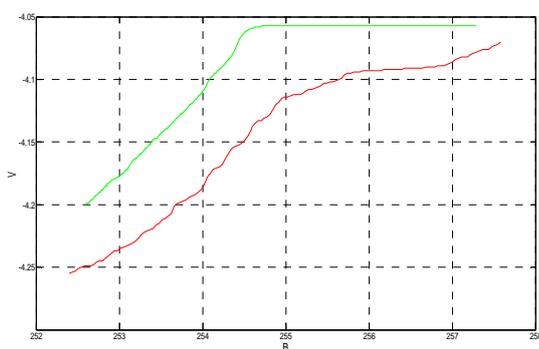


Рис. 3. Графики сопоставления сигналов

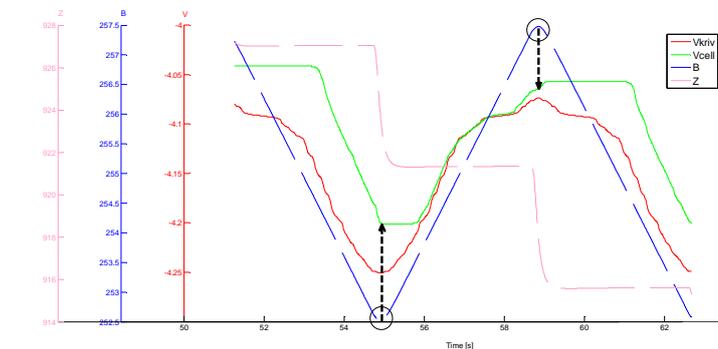


Рис. 4. Сигнал с датчика слежения за контуром  $V$  для нескольких строчек

На рис. 4 зеленой кривой обозначен сигнал с датчика слежения за контуром  $V$ , полученный при проходе по траектории обработки, красной кривой обозначен сигнал с датчика слежения за контуром  $V$ , полученный при предварительном обмере заготовки, синяя кривая – сигнал с энкодера оси  $B$  поворотного стола, розовая кривая – сигнал с энкодера оси  $Z$ . Искажение сигнала начинается в момент реверса по координате  $B$ , что говорит о возможном наличии упругого зазора в системе слежения.

Если принять, что наличие упругого зазора приводит к искажению сигнала датчика слежения за контуром  $V$ , то таким образом образуется ошибка копирования поверхности. Ошибку можно вычислить как разницу между «идеальным» сигналом копирования  $V_i$  в системе без зазора и сигналом копирования  $V_{mach}$ , полученном в системе с зазором при проходе траектории обработки при многократных реверсах по координате  $B$ .

### Этапы выполнения эксперимента

1) Подготовка, заключающаяся в установке нуля рабочей системы координат (привязка к заготовке для обработки на технологическом припуске) и настройке протоколирования сигналов энкодеров осей  $B1(t)$ ,  $Z1(t)$ ,  $Y2(t)$ ,  $V1(t)$ ,  $W2(t)$  на экране диагностики панели оператора.

2) Обработка ячейки  $150 \times 150$  по обычной УП без коррекции. Траектория – спираль, 1 проход, стенка заготовки обрабатывается с исходной толщины  $22.5$  мм до  $18.5$  мм, ширина снимаемого слоя  $b=4$  мм, подача  $F=3000$  мм/мин.

3) Производство замеров после 1-ого прохода с помощью портативного ультразвукового толщиномера. Необходимо произвести замеры толщины в 5-ти точках ячейки.

4) Обработка той же самой ячейки  $150 \times 150$  по траектории типа «спираль» по модифицированной УП с коррекцией: прогон на холостом ходу с увеличенным вылетом инструмента, при этом следящая опора должна находиться в контакте с задней стенкой заготовки. Во время прогона на холостом ходу производится запись сигналов энкодеров осей  $B1(t)$ ,  $Z1(t)$ ,  $Y2(t)$ ,  $V1(t)$ ,  $W2(t)$  в xml-файл средствами системы протоколирования СЧПУ.

5) Обработка той же самой ячейки 150x150 по траектории типа «спираль» по модифицированной УП с коррекцией: прогон под нагрузкой. 1 проход, стенка заготовки обрабатывается с толщины 18,5мм до 14,5мм, ширина снимаемого слоя  $b=4$ мм, подача  $F=3000$ мм/мин,  $S=10000$ об/мин.

6) Производство замеров после 2-ого прохода с помощью портативного ультразвукового толщиномера. Необходимо произвести замеры толщины в 5-ти точках ячейки.

#### Библиографические ссылки

1. Технологическое оборудование машиностроительных производств / А. Г. Схиртладзе, Новиков В. Ю., Соломенцева Ю. М. и др. // Учебное пособие для машиностроительных специальных вузов, 2001. 407 с.

2. Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А. Обработка деталей на станках с ЧПУ. М.: учебное пособие, 2008. 299 с.

3. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Системы числового программного управления. М.: учебное пособие, 2005. 296 с.

4. Курдин С.Н. Технология производства и контроля вафельных оболочек: пособие для технологов, мастеров, конструкторов и студентов специальных факультетов, 1987. 230 с.

#### References

1. Tehnologicheskoe oborudovanie mashinostroitel'nyh proizvodstv / A. G. Shirtladze, Novikov V. Ju., Solomenceva Ju. M. I dr.: Uchebnoe posobie dlja mashinostroitel'nyh special'nyh vuzov. 2001. 407 p.

2. Fel'dshtejn E. Je., Kornievich M. A. Obrabotka detalej na stankah s ChPU. M.: Uchebnoe posobie, 2008. 299 p.

3. Sosonkin V. L., Martinov G. M. Sistemi chislovogo programnogo upravleniya. M.: Uchebnoe posobie. 2005. 296 p.

4. Kudrin S.N. Technology proizvodstva and kontrolya vaphelnyh obolochek: posobie from technologov, masterov, konstruktorov and students special'nyh fakultetov, 1987. 230 p.

© Жежера С. А., 2023

УДК 629.7

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ.

А. С. Ленковец, А. А. Елаев, Р. Е. Хвостов, А. Л. Митрофанов

Акционерное общество «Композит»  
Российская Федерация, 141070, Московская область г. Королёв, Пионерская, 4

*Одной из главных задач при проектировании и создании летательных и космических аппаратов является снижение массогабаритных характеристик при одновременном сохранении или повышении механических свойств материалов и конструкций из них. Применение в ракетно-космической технике металлических композиционных материалов позволяет решить данную задачу.*

*Ключевые слова: жаропрочный композиционный материал, алюминиевый сплав, титановый сплав, волокна карбида кремния.*

## PROMISING METALLIC COMPOSITE MATERIALS FOR APPLICATION IN ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

A. S. Lenkovets, A. A. Elaev, R. E. Khvostov, A. L. Mitrofanov

Joint-stock company "Composite"  
4, Pionerskaya, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation

*One of the main tasks in the design and creation of aircraft and spacecraft is to reduce the weight and size characteristics while maintaining or improving the mechanical properties of materials and structures made of them. The use of metal composite materials in rocket and space technology makes it possible to solve this problem.*

*Keywords: high-temperature composite material, aluminum alloy, titanium alloy, silicon carbide fibers.*

На сегодняшний день развитие ракетно-космической техники (РКТ) является одним из приоритетных направлений в стране. Одними из основных задач как с момента создания первых образцов РКТ, так и сегодня, остаются снижение массы летательных аппаратов и увеличение их полезной нагрузки. Существует несколько подходов к решению подобных задач. Один, из которых это проектирование оптимальной конструкции летательных аппаратов, а другой это увеличение мощности двигательных установок. Сегодня использование подобных подходов к решению основных задач невозможно без разработки новых материалов, в том числе работоспособных при высоких температурах.

Наиболее широкое применение в РКТ получили титановые (BT6, BT14, BT20 и др.) и алюминиевые сплавы (АМг5, АМг6, Д20 и др.). Однако при повышении рабочей температуры деталей РКТ применение титановых и алюминиевых сплавов ограничено, в связи с чем используются более высокотемпературные сплавы на основе никеля или специальные конструкционные стали. Поэтому одной из главных задач является увеличение механических свойств сплавов титана и алюминия с одновременным снижением плотности. В свою очередь решением данной задачи может стать введение высокопрочных неметаллических волокон в сплавы титана и алюминия. В табл. 1 представлены неметаллические волокна и их основные свойства, производимые или разрабатываемые на сегодняшний день в РФ.

Как видно из табл. 1 механические свойства неметаллических волокон бора, карбида кремния и углерода могут достигать до 4000 МПа. Таким образом, например при введении 40-45% волокон бора в металлическую матрицу алюминиевых сплавов возможно увеличение механических свойств до 1100-1200 МПа в направлении армирования. Подобный эффект наблюдается и при армировании титановых сплавов волокнами карбида кремния. Зарубежом разработкой подобных материалов активно занимаются такие страны как США и Великобритания [1].

На сегодняшний день в РФ АО «Композит» является лидером по производству и разработке волокнистых металлических композиционных материалов с матрицами титановых и алюминиевых сплавов, упрочненных неметаллическими волокнами бора, углерода и карбида кремния. В табл. 2 представлены основные свойства волокнистых металлических композиционных материалов

Таблица 1

**Свойства армирующих неметаллических волокон**

Тип волокна	Норм. докум. или марка	Изготовитель	Диаметр, мкм	Прочность, МПа	Модуль Юнга, ГПа
В (борное)	ТУ 2112-065-00209013-2009	АО «ГНИИХТЭОС»	140±2	до 3800	до 400
SiC (Карбид кремния)	ТУ 20.13.64-213-00209012-2017	АО «ГНИИХТЭОС»	140±2	до 3500	до 380
SiC (Карбид кремния)	В стадии разработки	АО «Композит»	10-14	до 2000	до 270
С (углеродное)	UTM40-3К	ЮМАТЕКС	10-14	До 4000	до 250

Таблица 2

**Перспективные волокнистые композиционные материалы.**

Название материала	Стадия разработки	Типы полуфабрикатов	Прочность при растяжении, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа
АМг6-В	Опытно-промышленное производство	Листы, профили, трубчатые элементы	1100-1200	2650	200
АМг6-С	Опытно-промышленное производство	Листы, профили, трубчатые элементы	750-1000	2200	200
АМг6-SiC	В стадии разработки	Листы, профили, трубчатые элементы	600-1600	3000	160-180
ВТ6-SiC	В стадии разработки	Элементы конструкций и силовые элементы	700-1400	3900	180-200

Как видно из табл. 2 основные механические свойства волокнистых металлических композиционных материалов значительно превышают свойства металлических сплавов. Стоит отметить, что в АО «Композит» организовано опытно-промышленное производство деталей и элементов конструкций их композиционного материала АМг6-В. Для увеличения как механических свойств, так и повышения рабочих температур сплавов титана и алюминия отрабатывается технология получения композиционных материалов АМг6-SiC, АМг6-С и ВТ6-SiC. Разброс по представленным свойствам связан в первую очередь с количеством объемной долей армирующих волокон и с различной схемой армирования.

Таким образом можно сделать вывод, о том, что для дальнейшего развития РКТ необходима разработка и применение композиционных материалов, в частности волокнистых композиционных материалов, которые в свою очередь позволят значительно снизить вес современных летательных и космических аппаратов, а также повысить их надёжность.

**References**

1. Gerald C.R. Watt, Stephen Kyle-Henney, Andrew D. Crocombe and Stephen L. Ogin. Tensile stress-strain behaviour of multiaxial metal matrix composites. 20th International Conference on Composite Materials Copenhagen, 19-24th July 2015.
2. By Christoph Leyens, Joachim Hausmann, and Jorg Kumpfert. Continuous fiber reinforced titanium matrix composites: fabrication, properties and applications. // advanced engineering materials 2003, 5, № 6. page 399.

УДК 629.7.036.54

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
И СФЕРИЧЕСКИХ ВАФЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ  
СПОСОБОМ МЕХАНИЧЕСКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ**

А. А. Мацкив

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: genadiy.28@list.ru

*В статье рассмотрена разработанная методика оценки и проведения компенсационного расчета цилиндрических и сферических вафельных оболочек, изготавливаемых методом механического фрезерования.*

*Ключевые слова: методика оценки, компенсационный расчет, сферические оболочки, вафельный фон, программное обеспечение.*

**DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY AND SOFTWARE FOR CARRYING  
OUT A COMPENSATION CALCULATION OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL  
WAFFER SHELLS MANUFACTURED BY MECHANICAL MILLING**

A. A. Matskiv

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: genadiy.28@list.ru

*The article considers the developed methodology for evaluating and performing a compensation calculation of cylindrical and spherical wafer shells manufactured by mechanical milling.*

*Keywords: estimation methodology, compensation calculation, spherical shells, waffle background, software.*

Корпуса ЛА представляют собой тонкостенные цилиндрические и сферические оболочки с вафельным фоном на внутренне либо наружной поверхности. Наличие вафельного фона вызвано необходимостью снижения массы изделия, что является основным требованием в конструкции летательного аппарата с обеспечением жесткости и прочностных характеристик конструкции корпуса ЛА, а также повышения максимальных критических напряжений при работе на устойчивость. Основным способом изготовления вафельного фона в современном ракетостроении является механическое фрезерование готового цилиндра после операции вальцовки и сварки.

На актуальных изготавливаемых изделиях ракетно-космической техники предприятия площадь фрезеруемых поверхностей оболочек составляет до 14 м<sup>2</sup>. При столь высокой площади обрабатываемой поверхности не редки появления отступлений от конструкторской документации, что может привести к дорогостоящему браку или к долгому процессу принятия решения и согласованию непосредственно с военным представительством.

Основные причины появления отступлений при механической фрезеровки вафельного фона [1] представлены на рис. 1.

Разработка методики и программ компенсационного расчета при столь высокой стоимости материалов и большой вероятности появления отступлений при изготовлении является непосредственно актуальной.

В основу разработки методики и программного обеспечения были взяты номинальные геометрические характеристики вафельного фона цилиндрических и сферических оболочек для актуальной и

изготавливаемой на предприятии продукции. Основные геометрических характеристики представлены на рис. 2, 3.

С использованием данных геометрических характеристик, индивидуально для каждой оболочки исходя из испытываемых нагрузок в процессе выполнения заданной задачи была рассчитана  $\delta_{экв}$  – эквивалентная толщина оболочек.  $\delta_{экв}$  – это толщина условной гладкой оболочки с равномерным размазыванием жесткости ребер в окружном направлении по поверхности оболочки. [2]  $\delta_{экв}$  – рассчитывается для всех возможных в процессе эксплуатации типов воздействия: внутреннего давления, общей потери устойчивости и местной потери устойчивости.

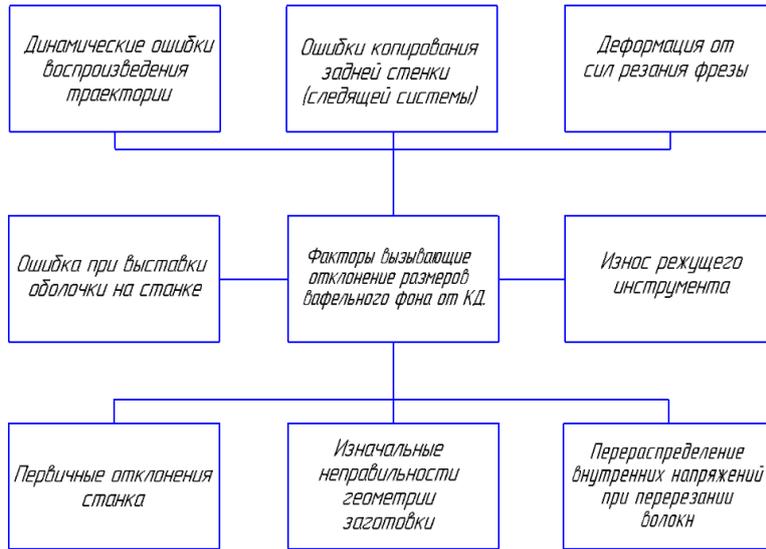


Рис. 1. Причины появления отступлений при механической фрезеровки

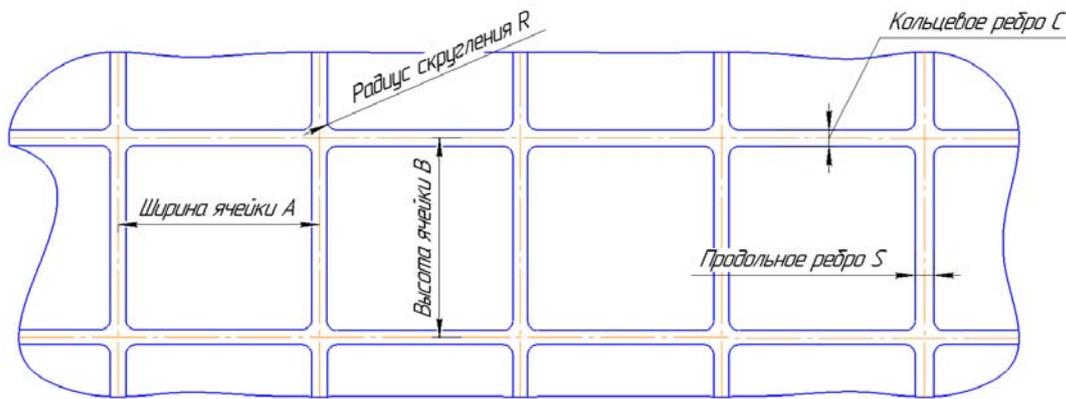


Рис. 2. Вафельный фон вид спереди

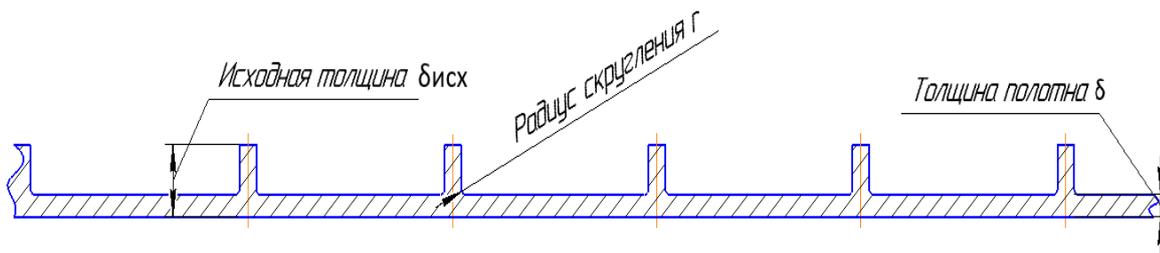


Рис. 3. Вафельный фон в сечении

Полученные расчетные данные являются номинальной отправной точкой для идеальной оболочки, при этом при работе с реальной оболочкой наши полученные результаты не должны быть ниже, чтобы сохранить несущую способность конструкции.

Зная минимум, за который нельзя выходить, определяем зависимость и сочетание основных характеристик вафельного фона, при которых будет выполняться важнейшее условие [3].

На основании полученных данных, для каждой цилиндрической и сферической оболочки делается программа, в которой основными вводными данными являются:  $A$ ,  $B$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $\delta_{исх}$ ,  $r$ ,  $\delta$ . А результатом расчета будет  $\delta_{экс}$ , которая не должна быть ниже номинальной для конкретной исследуемой оболочки [4], с учетом механических свойств материала [5].

С использованием разработанной методики были достигнуты следующие результаты:

- Рассчитана номинальная  $\delta_{экс}$  для каждой идеальной сферической и цилиндрической оболочки, изготавливаемой на предприятии для актуального изделия.
- Разработаны программы для проведения компенсационного расчета в случае отступления от конструкторской документации, которые можно использовать не только после процесса фрезерования, но и на начальном его этапе, при выявлении отклонений с последующей корректировкой программы ЧПУ.
- Значительно сокращено время принятия решений по отступлениям при выявлении отступлений, оговоренных в методике.
- Сокращения количества возможного брака и карточек разрешения на выявленные отступления в процессе механического фрезерования.
- Обучен персонал цеха изготовителя для использования методики в работе без участия инженерного сопровождения.
- Обучен персонал цеха изготовителя для использования методики в работе без участия инженерного сопровождения.

### Библиографические ссылки

1. Малов А.Н., Гриднев В.Н., Досчатов В.В. и др. Справочник технолога машиностроителя Том 2: Москва: машиностроение 1972. 568 с.
2. Пяткин В.А., Лизин В.Т. Прочность элементов оболочковых конструкций: Москва /XII: , 1971. 358с.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов: Киев «НАУКОВА ДУМКА» 1975. 704 с.
4. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность устойчивость колебания. Москва: Машиностроение, 1968. 463 с.
5. Лейкин А.Е., Пороцкий Э.С., Родин Б.И. Авиационное материаловедение Москва: Машиностроение, 1964. 458с.

### References

1. Malov A.N., Gridnev V.N., Doschatov V.V. I dr. Spravochnik tehnologa mashinostroitelya [Handbook of mechanical engineering technologist] Tom 2. Moscow:mashinostroenie, 1972. 568 p.
2. Pyatkin V.A., Lizin V.T. Prochnost elementov obolochkovih konstrukciy [Strength of shell structure elements] Moscow/XII 1971 358p.
3. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniu materialov [Handbook of Strength of Materials]: Kiev "NAUKOVA DUMKA" 1975. 704 p.
4. Birger I. A., Panovko Y.G. Prochnost ustoichivost kollebaniya. [Strength vibration resistance] Moscow: Mashinostroenie, 1968. 463 p.
5. Leykin A.E., Porockiy E. S., Rodin B. I. Aviacionnoe materialovedenie [Aviation materials science] Moscow: Mashinostroenie, 1964. 458p.

УДК 621.7.04

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 01570М**

И. Н. Первова

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: pin4499@mail.ru

*Рассматриваются особенности ротационной вытяжки сферических деталей. Описывается процесс ротационной вытяжки крупногабаритных элементов корпуса ракеты из алюминиевого сплава 01570М.*

*Ключевые слова: алюминиевый сплав 01570М, ротационная вытяжка, сферические детали.*

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF ROTATION EXTRUSION OF LARGE-SIZED SPHERICAL  
ROCKET BODY ELEMENTS FROM ALUMINUM ALLOY 01570M**

I. N. Pervova

JSC "Krasnoyarsk Machine-building Plant"  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: pin4499@mail.ru

*Features of rotation extrusion spherical elements are considered. The process of rotation extrusion large-sized elements of the rocket body from an aluminum alloy 01570M is described.*

*Keywords: aluminum alloy 01570M, rotation extrusion, spherical elements.*

Алюминий и его сплавы широко используются в аэрокосмической и оборонной промышленности. Низкий удельный вес алюминия и высокие механические свойства его сплавов дают широкие возможности резкого снижения веса изделий при сохранении той же прочности, а большая стойкость против коррозии позволяют применение в агрессивных средах.

Химический состав и механические свойства алюминиевого сплава 01570М при растяжении приведены в таблице 1 [1, 2]:

Таблица 1

Химический состав и механические свойства сплава 01570М

Химический состав, %											Механические свойства			
Al, не менее	Sc	Zr	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Ti	Проч	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Остальное	0,17-0,21	0,005-0,15	0,2	0,3	0,1	0,4-0,6	5,8-6,3	0,1	0,0002-0,005	0,01-0,05	0,11	400	280	15

Была поставлена задача изготовить сферический элемент корпуса ракеты. Уникальность задачи состоит в том, что при ротационной вытяжке тел вращения с криволинейной образующей, такой как сфера, трудно получить заданные толщину и контур на всей траектории вытяжки.

Работы велись с материалом - лист алюминиевый марки 01570М толщиной 30 мм.

Подготовительные работы, заключающиеся в исследовании деформационных способностей сплава 01570, проводились по заказу АО «Красмаш» в НИТИ «Прогресс». Полученные результаты показали, что сплав 01570 раскатывается даже в холодном состоянии, также была определена максимальная степень деформации при ротационной вытяжке данного сплава [3]

По разработанной технологии предусматривается установка на оправке плоской листовой заготовки, представляющей собой круг диаметром около 3 м с 4 отверстиями в центральной части для центрирования и фиксации, и далее применяется специальный способ обработки металлов давлением – ротационная вытяжка, для чего была спроектирована и изготовлена специальная сферическая оправка. Вытяжка производилась на универсальном раскатном стане УРС-3200.

Упрощенная схема ротационной вытяжки представлена на рис. 1: оправка с зафиксированной на ней заготовкой вращается, три ролика, прижимаясь к оправке на заданную толщину и двигаясь вниз, осуществляют вытяжку.

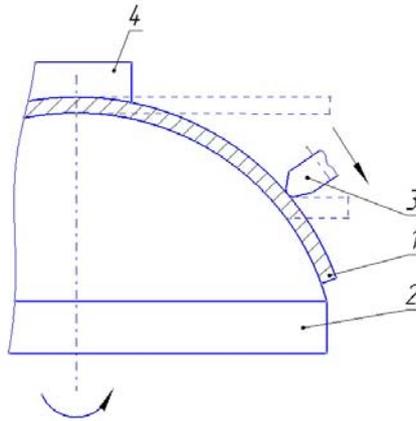


Рис. 1. Схема ротационной вытяжки:  
1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – ролик, 4 – прижим

Отличительной особенностью операций ротационной вытяжки от операций штамповки является локальный характер приложения усилия, что позволяет существенно снизить удельное и общее суммарное усилие деформирования. Процесс обеспечивает высокую точность и низкую шероховатость поверхности получаемого изделия, что в большинстве случаев позволяет исключить из процесса дальнейшую механическую обработку. При трении в месте контакта заготовки с инструментом заготовка локально разогревается в зоне обработки и, тем самым, теряет прочность лишь там, где это необходимо. В нашем случае идет выдавливание с утонением – процесс пластической деформации металла со значительным обжатием стенки детали и вытягиванием ее в продольном направлении [4]. При этом происходит нагартовка металла, то есть его упрочнение.

После предварительного расчета и подбора параметров ротационной вытяжки, таких как скорость вращения оправки, профиль и угол атаки ролика, зазор между роликом и оправкой, методика смазки машинным маслом [5], и введения их уточненных значений при испытаниях [6] была получена деталь с наружным контуром, близким к требуемому по КД (рис. 2).

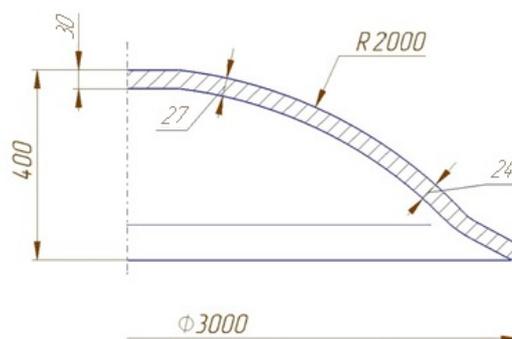


Рис. 2. Контур детали после ротационной вытяжки

Следующая наша цель – методом ротационной вытяжки из сварной обечайки получить деталь цилиндрического профиля переменной толщины из отечественного сплава ЧС-4.

#### Библиографические ссылки

1. ТУ 1-3-81-90 Технические условия. Плиты повышенного качества из алюминиевого сплава марки АМг6 с пониженным газосодержанием М: Стандартиформ, 1990.
2. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М: Стандартиформ, 2019.
3. Акт-отчёт «Определение деформационных способностей материала 01570М ТУ-1-3-206-2015». Ижевск, НИТИ «Прогресс», 2021.
4. Могильный, Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. -М: Машиностроение.; 1983-213с.
5. ОСТ 92-1634-76 Вытяжка деталей ротационная. Типовые технологические процессы. –М: ГОНТИ-2, 1977.
6. Отчеты рабочей группы по ротационной вытяжке 6 заготовок детали 65.20.401 на УРС-3200. Красноярск, АО «Красмаш», 2022.

#### References

1. TU 1-3-81-90 Tekhnicheskie usloviya. Plity povyshennogo kachestva iz alyuminievogo splava marki АМg6М s ponizhennym gazosoderzhaniem М: Standartinform, 1990.
2. GOST 4784-2019 Alyuminiy i splavy alyuminievye deformiruemye. М: Standartinform, 2002.
3. Akt-otchyot «Opredelenie deformatsionnyh sposobnostey materiala 01570М TU 1-3-206-2015». – Izhevsk, NITI «Progress», 2021.
4. Mogil'ny, N.I. Rotatsionnaya vytyazhka obolochkovykh detaley na stankah. М: Mashinostroenie.; 1983-213s.
5. OST 92-1634-76 Vytyazhka detaley rotatsionnaya. Tipovye tehnologicheskie protsessy. М.: GONTI-2, 1977.
6. Otchyoty rabochey gruppy po rotatsionnoy vytazhke 6 zagotovok detali 65.20.401 na URS-3200. Krasnoyarsk, AO «Kras mash», 2022.

© Первова И. Н., 2023

УДК 629.7.036.54

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НАСОСОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. А. Савчин

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: savchin.dim@yandex.ru

*В статье рассмотрены особенности математического моделирования рабочих процессов насосов жидкостных ракетных двигателей, возникающих при проведении гидравлических испытаний*

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, турбонасосный агрегат, гидравлические испытания, математическое моделирование*

## MATHEMATICAL MODELING OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE PUMP TESTING PROCESS

D. A. Savchin

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: savchin.dim@yandex.ru

*The paper considers particular qualities, related with mathematical modeling process of liquid-propellant rocket engine pump hydraulic tests*

*Keywords: liquid-propellant rocket engine, turbo-pump unit, hydraulic tests, math modeling*

Согласно источнику [1] работоспособность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в том числе определяется соответствием давления в камере сгорания и расхода компонентов топлива требованиям конструкторской документации (КД). В современных ЖРД больших тяг данные параметры обеспечиваются насосной системой подачи, основным агрегатом которой является турбонасосный агрегат (ТНА).

Соответствие давления на выходе, расхода и КПД ТНА обеспечивается изготовлением таких деталей и сборочных единиц (ДСЕ) как шнек, центробежное колесо, а также проточных частей корпусов подвода и отвода согласно требованиям КД.

Изготовление вышеуказанных ДСЕ достаточно трудоемко и включает в себя различные технологии, в том числе трудноуправляемые процессы литья, не обеспечивающие стабильность геометрических характеристик ДСЕ ТНА, определяющих основные параметры работы агрегата.

Однозначным способом подтверждения способности ДСЕ ТНА обеспечить работоспособность агрегата является проведение гидравлических испытаний (ГДИ). Целью данных испытаний является определение характеристик насоса при неразрушающем контроле [2]. По результатам таких испытаний возможно получить данные о работе насосов в виде напорных, мощностных и КПД характеристик.

ГДИ – трудоемкий процесс, включающий сборку-разборку насосов, контроль работы изделия на испытательном стенде, анализ результатов испытаний, проведение мероприятий по устранению влаги из насоса. Также вовремя ГДИ происходит расход ресурса деталей насосов, технологических подшипников и манжет, что дополнительно повышает затраты и снижает надежность.

С учетом значительных материальных и временных затрат на проведение ГДИ, применение данного способа получения результатов работы насосов при принятии решения о возможности дальней-

шего качественного изготовления ТНА с использованием ДСЕ, имеющих отступления от КД в части геометрии проточной части, нецелесообразно.

Для исключения продолжения работ с ДСЕ с отступлениями, влияющими на заданные параметры работы ТНА, для определения требуемой величины доработки, а также сокращения времени на разработку новых изделий необходимо получить метод, определяющий соответствие насосов установленным требованиям без проведения физического эксперимента.

С учетом широкого распространения компьютеров таким методом может стать моделирование с использованием компьютерной программы, основанной на математической модели насосов ЖРД, с получением соответствующих результатов для оценки работы насосов и влияния отступлений на работоспособность ТНА.

Согласно [3] такого рода моделирование проводится в различных программных пакетах (SolidWorks, ANSYS и т.д.), что предполагает разработку трехмерной модели проточной части насоса, а также повышенные требования к вычислительной мощности оборудования. С учетом данных недостатков разработана собственная математическая модель, реализованная в виде программы для ЭВМ.

К математической модели предъявлялись следующие требования:

- обеспечение минимальной погрешности определения напорной и КПД характеристики;
- моделирование работы насосов различной конструкции;
- учет режимов испытаний при моделировании;
- использование данных о конфигурации насосов, представленные в КД.

При разработке математической модели были выполнены следующие этапы согласно [4]:

- обследование объекта моделирования, в ходе которого сформированы основные требования к модели;
- концептуальная постановка задачи, в ходе которого приняты гипотезы и допущения, существенно облегчающие моделирование;
- математическая постановка задачи моделирования, по результатам которого определен требуемый математический аппарат;
- реализация математической модели в виде программы для ЭВМ.

К программе для ЭВМ предъявлялись следующие требования:

- удобство и простота использования;
- представление результатов моделирования в форме, аналогичной указанной в КД;
- отсутствие повышенных требований к вычислительной мощности ЭВМ.

В результате проведенной работы по исследованию рабочих процессов в насосах ЖРД и установления математических зависимостей, описывающих данные процессы, были созданы математическая модель и компьютерная программа, удовлетворяющие предъявленным к ним требованиям.

По итогам исследования модели установлены критические параметры испытаний – значения расхода, частоты вращения ротора и давления на входе в насос, при которых сохраняется адекватность модели. Критическое значение расхода составило 200% от номинального. Установлено, что адекватность модели не зависит от частоты вращения ротора и входного давления. Представленные диапазоны режимов работы насосов при моделировании испытаний значительно превышают аналогичные, используемые во время физического эксперимента, что говорит об отсутствии соответствующих ограничений на практическую применимость модели.

Установлено качественное соответствие модельных характеристик аналогичным теоретическим кривым, представленным в работе [5], что позволяет сделать вывод о правильности используемых для моделирования зависимостей и алгоритма работы программы в части отражения физических принципов работы насосов ЖРД.

Для определения количественного соответствия результатов моделирования был проведен сравнительный анализ данных, полученных при помощи разработанной компьютерной программы и данных физического эксперимента. В результате установлено, что относительная погрешность определения напора на расчетном режиме составила в среднем 1,5%, относительная погрешность определения КПД на расчетном режиме – 3,6%. Максимальное относительное отклонение модельной напорной характеристики от экспериментальной – 5%, максимальное относительное отклонение модельной КПД характеристики от экспериментальной – 4%.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что разработанная в рамках исследования программа может быть внедрена в качестве средства для предварительной оценки

правильности функционирования насосов ТНА как в процессе серийного изготовления, так и в процессе разработки новых изделий, что сократит временные и материальные затраты, связанные с изготовлением ТНА ЖРД.

### Библиографические ссылки

1. Краев М.В., Назаров В.П., Яцуненко В.Г. Основы теории и расчета надежности ракетных двигателей: учеб. пособие. Красноярск: СибГАУ, 2008. 192с., с ил.
2. Коломенцев А.И., Краев М.В., Назаров В.П. и [и др.]. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей. Красноярск: СибГАУ; Москва: МАИ, 2006. 336 с.
3. Wilcox David C. Turbulence modeling for CFD 3<sup>rd</sup> edition: DCW industries, 2006. 515 p.
4. Введение в математическое моделирование: учеб. пособие под ред. П.В. Трусова. М. : Логос, 2005. 440 с.
5. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. Изд. 3-е, М. : Машиностроение, 1986. 376 с.

### References

1. Kraev M.V., Nazarov V.P., Yatsunenkov V.G. *Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti raketnykh dvigateley* [The basics of reliability theory and calculation of rocket engines]. Krasnoyarsk, SibGAU., 2008, 192 p.
2. Kolomentsev A.I., Krayev M.V., Nazarov V.P, [et al.]. *Ispytaniye I obespecheniye nadezhnosti raketnykh dvigateley*. [Testing and reliability ensuring of rocket engines]. Krasnoyarsk; Moscow: MAI, 2006. 336 p.
3. Wilcox David C. *Turbulence modeling for CFD* 3<sup>rd</sup> edition: DCW industries, 2006. 515 p.
4. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie* [Introduction to math modeling]. Moscow: Logos, 2005. 440 p.
5. Ovsyannikov B.V., Borovskij B.I. *Teoria i raschet agregatov pitania zhidkosnyh raketnykh dvigateley* [Theory and calculation of liquid-propellant rocket engines fuel units]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 440 p.

© Савчин Д. А., 2023

УДК 621.7

**ОТРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ  
НА СТАНКАХ С ЧПУ**

А. В. Скомороха, М. В. Яковлев

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: kras@krasmail.ru

*Рассмотрена возможность высокопроизводительной обработки легированной стали с высокой твердостью с применением прогрессивного режущего инструмента на станках с числовым программным управлением для обработки деталей РКТ.*

*Ключевые слова: высокопроизводительная обработка, прогрессивный режущий инструмент.*

**DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF HIGH-PERFORMANCE  
STEEL PROCESSING TECHNOLOGY ON CNC MACHINES**

A. V. Skomorokha, A. V. Yakovlev

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: kras@krasmail.ru

*The possibility of high-performance processing of alloy steel with high hardness using progressive cutting tools on machines with numerical control for processing RCT parts is considered.*

*Keywords: high-performance processing, progressive cutting tools.*

В изделиях ракетно-космической техники широко применяются ДСЕ, выполненные из легированных сталей с высокой твердостью. Фрезерная обработка таких деталей занимает большой объем времени, большой расход материала и режущего инструмента и как следствие большую трудоемкость и высокую стоимость изготовления данных ДСЕ.

Проблема заключалась в невозможности изготовления ДСЕ из стали 09Х16Н4Б (ЭП56) с твердостью до 44 единиц HRC по имеющейся технологии имеющимся в наличии режущим инструментом, что могло привести большим срывам сроков по договорным обязательствам, при этом существующая трудоемкость кратно превышала установленные нормы. Также по существующей технологии при обработке данных ДСЕ наблюдался огромный расход режущего инструмента, стойкость которого не превышала 15 минут до износа, при этом обработка велась на низких режимах резания (подача составляла не более 20мм/мин).

С учетом выявленных проблем, в ходе предстоящей работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Подобрать и отработать режущий инструмент, позволяющий вести обработку на режимах, обеспечивающих изготовление ДСЕ в установленные сроки и нормы, при этом обеспечить снижение существующего расхода режущего инструмента.

2. Откорректировать и отработать технологию с учетом подобранного режущего инструмента.

С целью обеспечения изготовления ДСЕ в установленные сроки, была оперативно проведена работа по поиску имеющегося в наличии в Обществе инструмента, позволяющего этого достичь. По результатам проработки были подобраны несколько инструментов, имеющихся в наличии, которые

позволили с учетом полной переработки технологии достичь необходимых режимов резания (подача до 170 мм/мин), это инструмент производителей Mitsubishi, Pramet и ZCC.

Результат полученный на данном этапе работы, позволил обеспечить изготовление комплекта ДСЕ в установленные сроки, при этом расход оставался высоким, стойкость оставалась на уровне 15-20 минут.

Также ввиду специфики геометрии, при быстром износе пластин, который невозможно отследить из-за малой стойкости, зачастую она ломалась, что приводило к поломке корпуса.

С целью сокращения расхода РИ и еще большего ускорения процесса обработки проведен анализ и подбор наиболее подходящего РИ для достижения поставленных целей из представленного на рынке. После чего, требуемые образцы были запрошены у поставщиков для проведения производственных испытаний. В результате были получены РИ таких производителей как: SECO, Sandvik, ZCC и YG1.

Всего было получено 5 разновидностей инструмента из различных материалов с разными условиями применения, среди которых, были широко распространенные прямоугольные пластины типа АРКТ, а также не применяемые ранее в Обществе пластины с 4 режущими кромками типа ANGX и LNKT для обычной обработки и ENMX для высокоскоростной обработки с малыми съемами.

После получения всех образцов РИ, по каждой из них была индивидуально откорректирована технология обработки ДСЕ. По результатам отработки была посчитана стоимость одного часа работы каждого инструмента с учетом стойкости и выявлены наиболее лучшие инструменты для обработки сталей, учитывающие специфику имеющегося оборудования и ДСЕ.

При отработке фрез с пластинами типа АРКТ, как и при обработке первых деталей в сентябре 2021 года, были допущены случаи выхода из строя корпуса фрезы, хоть и достигнутая стойкость в разы превышала ранее полученные результаты, так как при малейшем сколе пластины, она практически сразу разрушается, что и влечет за собой поломку корпуса и его дальнейшую непригодность.

С наилучшей стороны, себя показали 2 инструмента, а именно:

1. Корпус EMP09-040... с пластинами LNKT120608 YBS303 производитель ZCC Китай – для обычной обработки.
2. Корпус FHF-ENMX... с пластинами ENMX0604 YG602 производитель YG1 Южная Корея – для ВСО с малыми съемами.

При отработке данных инструментов и по настоящее время не было сломано ни одного инструмента по причине скола режущей кромки. Выбранные инструменты не только обеспечивают высокую скорость и стойкость при обработке сталей, но еще и в разы снижают вероятность выхода из строя дорогостоящих корпусов. Также стоит отметить, что данные пластины имеют 4 режущих кромки в отличии от других образцов, у которых их 2, при этом, цена пластин значительно ниже, чем у других образцов.

Данные пластины являются наиболее выгодными как с производственной, так и с экономической точки зрения, они обеспечивают необходимую скорость обработки для изготовления ДСЕ в установленные сроки, так и являются наиболее дешевыми с учетом расчета стоимости работы одного часа инструмента при одинаковом объеме удаления материала за единицу времени.

Также данный инструмент был испытан при обработке ДСЕ из сталей 12X18H10T и 09X16H4B в других цехах Общества.

По результатам проведенных работ по подбору и отработке инструмента, цех был обеспечен требуемым инструментом в необходимом объеме.

С учетом оснащения необходимым объемом инструмента, с целью повышения производительности и снижения расхода РИ откорректированы и внедрены технологии изготовления проблемных ДСЕ, указанных в таблице 1.

По результатам внедрения, существовавшее фактическое время обработки, превышающее установленные нормы, было снижено в несколько раз, что позволило цеху значительно разгрузить станки, являющиеся узкими местами и увеличить выпуск товарной продукции. Результаты внедрения представлены в таблице 1. С учетом увеличения пропускной способности оборудования, была увеличена номенклатура ДСЕ обрабатываемых в цехе. Ранее механическая обработка данных ДСЕ в цехе не производилась.

## Результаты внедрения откорректированных технологий

Обозначение ДСЕ	Фактическое Тмаш до улучшений, н/ч	Тмаш полученное, н/ч
ДСЕ №1	437,7	117,5
ДСЕ №2	520	154
ДСЕ №3	120	76,05
ДСЕ №4	267,5	92,88
ДСЕ №5	479,6	120,2
ДСЕ №6	100	48,25

## Библиографические ссылки

1. ZCC, Каталог режущего инструмента, 2020, 1148 с.
2. YG-1, Каталог режущего инструмента, 2020/2021, 849 с.
3. PRAMET, Каталог режущего инструмента, 2020, 1297 с.
4. SANDVIK, Каталог режущего инструмента, 2020, 1469 с.
5. MITSUBISHI MATERIALS, Каталог режущего инструмента, 2019/2020, 1329 с.

## References

1. ZCC, Cutting tools catalog, 2020, 1148 p.
2. YG-1, Cutting tools catalog, 2020/2021, 849 p.
3. PRAMET, Cutting tools catalog, 2020, 1297 p.
4. SANDVIK, Cutting tools catalog, 2020, 1469 p.
5. MITSUBISHI MATERIALS, Cutting tools catalog, 2019/2020, 1329 p.

© Скомороха А. В., Яковлев М. В., 2023

УДК 621.891: 519.28

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ

А. Н. Смирнов, В. П. Шилов

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
Email: mcray\_san@list.ru

*Разработаны технологические процессы получения новых покрытий плазменным напылением, химико-термической обработкой поверхности и осаждением в вакууме. Приведены результаты сравнительной оценки работоспособности комбинированных покрытий.*

*Ключевые слова: комбинированное покрытие, плазменное напыление, химико-термическая обработка, подвижное сопряжение.*

## APPLICATION OF MULTILAYER SOLID LUBRICANT COATINGS IN TRIBO-CONJUGATIONS

A. N. Smirnov, V. P. Shilov

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
Email: mcray\_san@list.ru

*Technological processes for obtaining new coatings by plasma spraying, chemical-thermal surface treatment and vacuum deposition have been developed. The results of a comparative assessment of the performance of combined coatings are presented.*

*Keywords: combined coating, plasma spraying, chemical-thermal treatment, mobile coupling.*

**Введение.** Применение традиционных конструкционных материалов уже не в состоянии удовлетворить комплекс постоянно возрастающих требований к повышению надежности, качества, долговечности, безопасности и экономичности конкурентно-способных изделий всех отраслей машиностроения. В связи с этим экономически и технически целесообразно развивать принципиально новый подход к выбору материалов уже на стадии проектирования. Механическую прочность детали можно обеспечить за счёт применения материала с высоким технико-экономическим показателем, а специальные свойства рабочей поверхности сплошным или локальным формированием на ней покрытий [1, 2], а также воздействием высокоэнергетических источников энергии на поверхности детали с покрытием или без него [3, 4].

В результате обеспечиваются необходимые условия свойства рабочей поверхности, сочетающиеся с экономией дорогостоящих материалов и сплавов.

В производстве ракетно-космической техники применяют защитные покрытия из оксида алюминия для обеспечения надёжной работы изделий в условиях действия циклически изменяющиеся термических нагрузок. Оксид алюминия или двуокись циркония наносят на головные обтекатели ракет, камеры сгорания и сопла ракетных двигателей, карбид вольфрама используют для защиты от эрозии графитовых сопел твердотопливных ускорителей, что увеличивает срок службы сопла более чем в 100 раз.

**Экспериментальные исследования и результаты.** Разработаны технологические процессы получения новых покрытий плазменным напылением [4], химико-термической обработкой поверхности и осаждением в вакууме.

Результаты предварительных исследований износостойкости напыленных плазменных твердосплавных покрытий убедительно показывают преимущество их в тяжелых условиях трения в абразивной среде.

Одним из основных требований, предъявляемых к антифрикционным твердосмазочным покрытиям для обеспечения их долговечности, является высокая адгезия материала покрытия к подложке [1, 2]. Увеличение адгезии материала покрытия может достигаться путем нанесения на подложку подслоя мягкого металла, например меди [2], или предварительной активацией поверхности подложки, например осаждением галлия [3].

Целью исследований являлось изучение долговечности и антифрикционных свойств, многослойных твердосмазочных покрытий, имеющих в своем составе подслои галлия и меди, полученных различными способами, в том числе и путем осаждения в вакууме.

Исследования указанных многослойных твердосмазочных покрытий на четырехшариковой машине трения показали, что наиболее низкими коэффициентами трения во всем исследованном температурном диапазоне обладают покрытия, имеющие подслои меди (рис. 1).

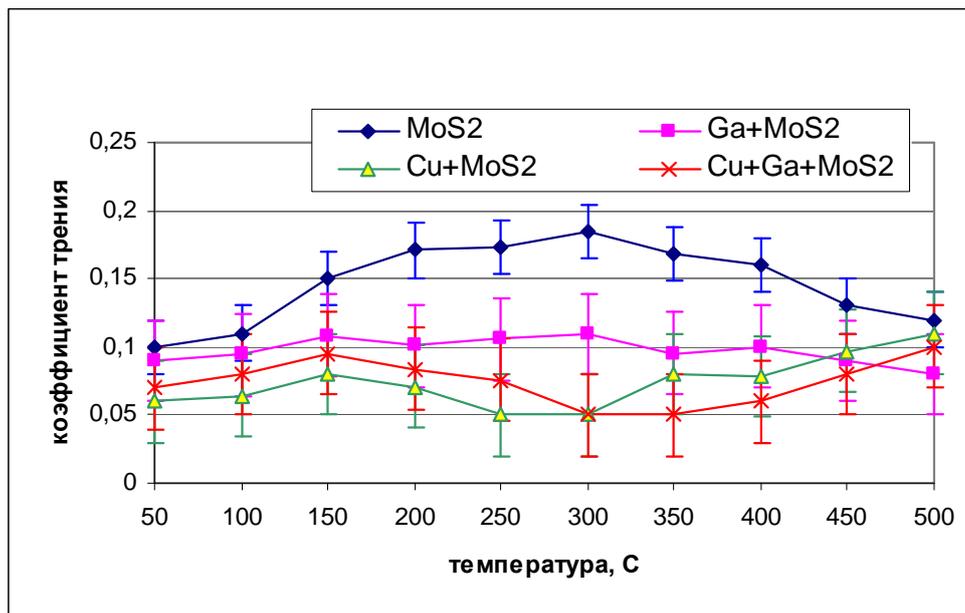


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от температуры при трении по металлическому подслою с нанесенной пленкой дисульфида молибдена

**Заключение.** Использование твердосмазочных комбинированных покрытий повысит надежность и долговечность подвижных сопряжений. Для широкого использования таких покрытий требуется разработка технологического процесса их получения с помощью вакуумного осаждения, микродугового оксидирования и др. методов.

### Библиографические ссылки

1. Хопин П.Н. Эффективность функционирования трибосопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенными магнетронным и суспензионным методами. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, № 9, с. 96–104, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-96-104
2. Наномодифицированная оксидная композиционная конструкционная керамика и ультраструйный метод оценки ее эксплуатационных свойств. / Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Судник Л.В., Казанцев В.П. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, № 8, с. 25–33, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-25-33
3. Бабин С.В., Егоров Е.Н., Фурсов А.А. Влияние технологических параметров процесса плазменного напыления на макроструктуру титановых покрытий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2020, № 4, с. 44–53, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-44-53.

4. Смирнов А. Н., Дюкарев А. Ю. Повышение работоспособности деталей подвижных сопряжений за счет создания и модификации поверхностных слоев методами комбинированных технологий // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : в 2 ч. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. Ч. 1. С. 311-313.

### References

1. Khopin P.N. The Efficiency of Tribocoupling with MoS<sub>2</sub>-Based Solid Lubricant Coatings Using Magnetron and Suspension Sputtering. Proceedings of Higher Educational Institutions. // Machine Building, 2019, no. 9, pp. 96–104, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-96-104

2. Nanomodified Oxide Composite Structural Ceramics and Ultra-Jet Method for Evaluating Its Operational Properties. Proceedings of Higher Educational Institutions. / Galinonskiy A.L., Bochkarev S.V., Sudnik L.V., Kazantsev V.P. // Machine Building, 2019, no. 8, pp. 25–33, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-25-33

3. Babin S.V., Egorov E.N., Fursov A.A. The Influence of Technological Parameters of the Plasma Spraying Process on the Macrostructure of Titanium Coatings // BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2020, no. 4, pp. 44–53, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-44-53

4. Smirnov A.N., Dyukarev A.Yu. Improving the performance of parts of movable interfaces by creating and modifying surface layers using combined technologies // Reshetnev readings : materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems Academician M. F. Reshetnev : in 2 hours; SibGU named after M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2022. Part 1. pp. 311-313.

© Смирнов А. Н., Шилов В. П., 2023

УДК 629

## АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ГИБКИ ТРУБ НА ТРУБОГИБЕ

С. В. Титенков<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

E-mail: Titenkov-sv@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: VZ@sibsau.ru

*Рассматривается алгоритм разработки управляющей программы для гибки труб на трубогибе с обеспечением точности получаемых размеров траектории труб после их изгиба в условиях реального аэрокосмического производства.*

*Ключевые слова: алгоритм разработки управляющей программы трубогибочного станка.*

## ALGORITHM FOR DEVELOPING A CONTROL PROGRAM FOR BENDING PIPES ON A PIPE BENDING MACHINE

S. V. Titenkov<sup>1</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk machine-building plant"

29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

E-mail: Titenkov-sv@mail.ru

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: VZ@sibsau.ru

*An algorithm for developing a control program for bending pipes on a pipe-bending machine with the accuracy of the obtained dimensions of the pipe trajectory after bending them in real aerospace production is considered.*

*Keywords: algorithm for developing a control program for a pipe bending machine.*

При разработке управляющей программы гибки труб на трубогибе требуется соблюдать ГОСТ 20999–83 (СТ СЭВ 3585-82) в целях приведения её формата к стандартной унифицированной форме, что может позволить редактировать и совершенствовать управляющую программу под новую геометрическую информацию (для вновь разрабатываемых труб с новой траекторией), под новые введённые стандарты технологического процесса, под новый материал трубы (с другими физико-химическими характеристиками, где требуется применять другие параметры давления динамических частей станка, под новую технологическую оснастку и станки разных производителей).

Мехатронная система алгоритма гибки тонкостенных труб (с использованием гибридной аналогово-цифровой системы управления автоматикой) сможет обеспечить соблюдение требуемого качества гибки тонкостенных труб, как в автоматическом режиме (для серийных деталей сборочных единиц), так и в ручном режиме (для уникальных единичных изделий).

Предлагается алгоритм разработки управляющей программы для гибки труб на трубогибе показанному на рисунке 1 [1]:

1. При наличии трубы-эталона в соответствии с ОСТ 92-1600-84, с помощью измерительных приборов и датчиков в конструкции агрегата гибки производится измерение трубы, с возможностью измерения радиусов. Замеры производятся последовательно через промежуточные контрольные точки.

Расстояние между контрольными точками определяется требованиями конструкторской документации или технологией производства. при отсутствии технических требований в чертеже.

2. В соответствии с ОСТ 92-1601-84 задаются припуски обеспечивающие требования и ограничения оснастки трубогибного станка. Пример полученной 3D модели трубы показан на рис. 2.

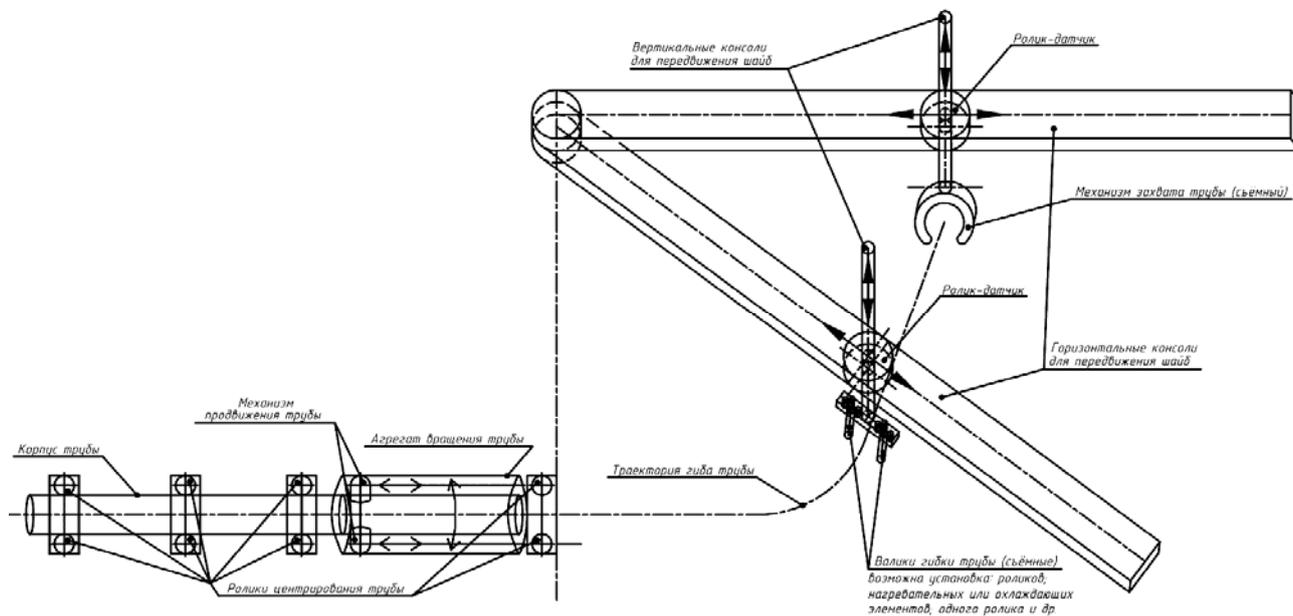


Рис. 1. Эскиз предлагаемой конструкции агрегата гибки труб

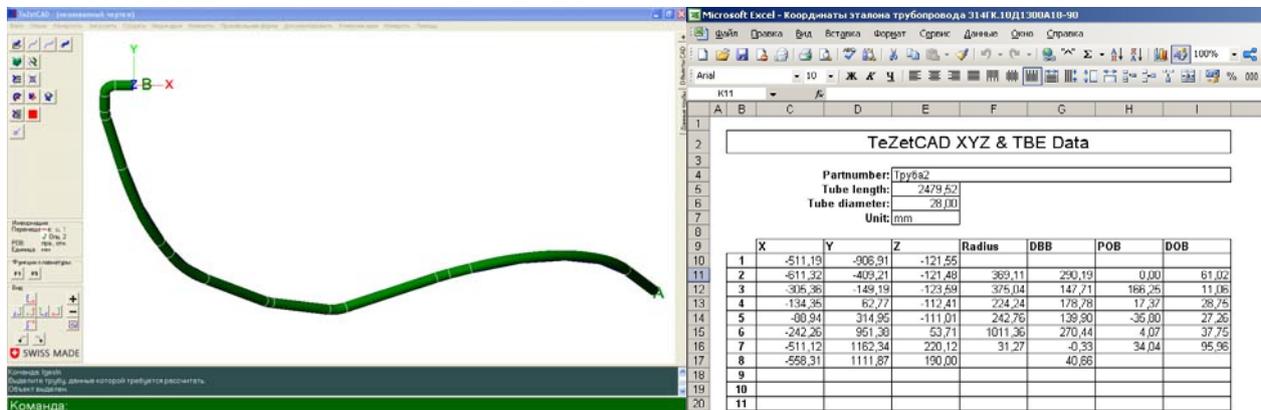


Рис. 2. Пример 3D-модели трубы и пример Excel с координатными данными траектории трубы

3. По 3D-модели детали управляющей программой формируются координаты трубопровода программы для трубогиба, в формате, поддерживаемом данной моделью оборудования, или в виде файла Excel, содержащего таблицу данных (рис. 2).

4. Данные управляющей программы вносятся в систему управления автоматикой трубогиба, с последующей верификация процесса гибки. При возникновении проблем, в процессе верификации, рассматривается возможность изменения конфигурации трубы.

5. После получения пробной детали измеряем ее с помощью контрольно-измерительной машины и программного пакета трубогиба по контрольным точкам [2], сравниваем полученную 3D-модель пробной детали с 3D-моделью трубы -эталона. Функция "Корректировка данных трубы" должна позволять создавать новый откорректированный блок данных трубы, который передается на гибочную машину.

6. После окончательной корректировки получаем управляющую программу-эталон. Опции: *измерения, сравнения, создания корректировочных данных и гибки* можно повторять. Однако наибольшая часть отклонения должна устраняться уже на первом этапе.

Работа агрегата гибки, показанного на рисунке 1, должна исключать криволинейных виражей траектории изгиба трубы, чего можно добиться за счёт подбора установки расстояния между движущимися составными частями агрегата, расположение которых должно регулироваться датчиками. Радиус охвата действия замеров роликов-датчиков должен быть достаточным для охвата всей траектории изгиба трубы. Главная задача – обеспечение требуемой траектории изгиба трубы за счёт изменения местоположения движущихся составных частей агрегата гибки. При любом варианте крепежа датчиков нужно предусмотреть возможность их регулировки, ремонта и замены.

Автоматизация гибки тонкостенных труб обеспечивает повышение качества изделий, производительности, снижения затрат производства. Применение представленной схемы-методики разработки управляющей программы систематизирует данный процесс и даёт возможность её применения при создании универсального техпроцесса гибки ПТС позволяющего не создавать вновь новый техпроцесс для трубопроводов [4] с другими характеристиками (диаметрами, длинами, материалами).

### Библиографические ссылки

1. Титенков С.В., Журавлев В.Ю. Оптимальная конструкция агрегата гибки труб, применяемых в аэрокосмической отрасли // Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч. конф.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Ч. 1, с.266-268.
2. Лунин К.С. Совершенствование производства трубопроводов на основе гибки труб с продольным сжатием : дис. ... канд. техн. наук. Орёл : ОГУ им. И.С.Тургенева, 2017. 113с.
3. Титенков С.В., Журавлев В.Ю. Особенности технологического совершенствования и оптимизации затрат производства 3D-конфигурации труб // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т.21, №1. С. 125-135. Doi:10.31772/2587-6066-2020-21-1-125-135

### References

1. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Optimalnaya konstrukciya agregata gibki trub, primenyaemih v aerokosmicheskoy otrasli [Optimal design of the tube bending line used in aerospace industry]. Reshetnevsky readings: materials of the XXV Intern. scientific. cohf.: 2 parts ; under the general editorship of Y. Y. Loginov; Sib. state univ., Krasnoyarsk, 2021, Part 1, p. 266-268.
2. Lunin K.S. Sovershenstvovanie proizvodstva truboprovodov na osnove gibki trub s prodolnim sgatiem. Dis. kand. teh. nauk. [Kand. techn. sci. diss] Orel, Turgenev OGU Publ., 2017, 113 p.
3. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Peculiar properties of technological improvement and optimization of production costs of 3D-configuration pipes. Siberian Journal of Science and Technology. 2020, Vol. 21, No. 1, P. 125-135. Doi:10.31772/2587-6066-2020-21-1-125-135.

© Титенков С. В., Журавлев В. Ю., 2023

УДК 62.02

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ВСТАВОК В СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Л. С. Удод<sup>1\*</sup>, А. Е. Милютин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
Российская Федерация, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9

\* E-mail: liludallaz@gmail.com

*В большинстве современных космических аппаратов применяются трехслойные сотовые конструкции, в состав которых входят закладные элементы. Данная работа содержит результаты исследований факторов влияющих на несущую способность вставок в сотовых конструкциях.*

*Ключевые слова: сотовая конструкция, закладной элемент, разрушающая нагрузка, несущая способность, испытания.*

## RESEARCH OF FACTORS AFFECTING THE LOADING CAPACITY OF INSERTS IN HONEYCOMB STRUCTURES

L. S. Udod<sup>1</sup>, A. E. Milyutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Communications of Emperor Alexander I  
9, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation

\* E-mail: liludallaz@gmail.com

*In most modern spacecraft, three-layer honeycomb structures are used, which include embedded elements. This work contains the results of studies of factors affecting the bearing capacity of inserts in honeycomb structures.*

*Keywords: honeycomb structure, embedded element, breaking load, bearing capacity, testing.*

С целью повышения весовой эффективности в составе современных космических аппаратов (КА) широко применяют трехслойные сотовые конструкции из полимерных композиционных материалов. Уникальное сочетание свойств материалов применяемых в таких конструкциях обеспечивает надежность при эксплуатации КА. Это связано в первую очередь с высокой жесткостью и прочностью конструкции, которую обеспечивает соотношение схемы армирования обшивок и параметры сотового заполнителя, такие как высота, размер стенки ячейки, форма, материал. К трехслойным сотовым конструкциям в составе КА относятся сотовые панели. Трехслойная сотовая панель представляет собой конструкцию из двух обшивок с расположенным между ними сотового заполнителя, соединенных между собой через клей, для обеспечения совместной работы всех элементов. В настоящее время широко применяются сотовые панели с обшивками из полимерных композиционных материалов.

В сотопанели устанавливают различные закладные элементы и фиксируют их в основном при помощи клеев. Закладные элементы необходимы для позиционирования и фиксации панелей в пространстве относительно друг друга, а так же для фиксации на их поверхности элементов служебных систем и полезной нагрузки. Номенклатура закладных элементов достаточно велика, вид закладного элемента зависит от нагрузки приходящейся на этот элемент. При выборе закладной детали необходимо учитывать факторы, которые могут повлиять на несущую способность закладной: способ

вклеивания закладной детали, высота сотозаполнителя, размер и конфигурация ячеек сотового заполнителя, толщина композиционных обшивок и геометрия закладного элемента [1]. Одним из часто применяемых видов закладных элементов в сотовых панелях являются вставки в форме катушек [2], с помощью которых выполняется фиксация различных элементов служебных систем и полезной нагрузки с корпусом КА, а так же такелажные работы с панелями.

При вклеивании вставок в сотовые панели с обшивками из полимерных композиционных материалов (ПКМ) помимо известных факторов влияющих на несущую способность, которые можно учесть при выборе закладного элемента, существуют скрытые факторы, которые возникают в ходе производственного процесса. Выявление данных факторов возможно только практическим путем, при изготовлении материальной части с последующим проведением механических испытаний по определению предела прочности при вырыве [3, 4].

Целью настоящей работы является исследование факторов, влияющих на фактическое усилия нагружения закладного элемента при проведении механических испытаний на вырыв, сравнение результатов аналитических методов расчета несущей способности с экспериментальными данными, полученными при натурных испытаниях на образцах свидетелях. В качестве объекта исследований был изготовлен комплект образцов представляющий собой образцы сотовой панели габаритными размерами 200x200 мм, высотой 30 мм состоящие из обшивок из ПКМ и расположенного между ними алюминиевого сотового заполнителя соединенные через пленочный эпоксидный клей, с вклеенной в центр вставкой в виде катушки. Образцы были разделены на группы по характеру факторов, влияющих на несущую способность закладного элемента. Критерием положительной оценки результатов испытаний образцов являлось превышение или соответствие разрушающей нагрузки при вырыве над расчетным для данного вида испытаний. По мимо образцов для определения предела прочности закладных элементов при вырыве были изготовлены образцы из ПКМ для определения предела прочности при сжатии, образцы заливки вставки.

На рис. 1 представлен внешний вид образцов для определения предела прочности при вырыве после демонтажа обшивок.

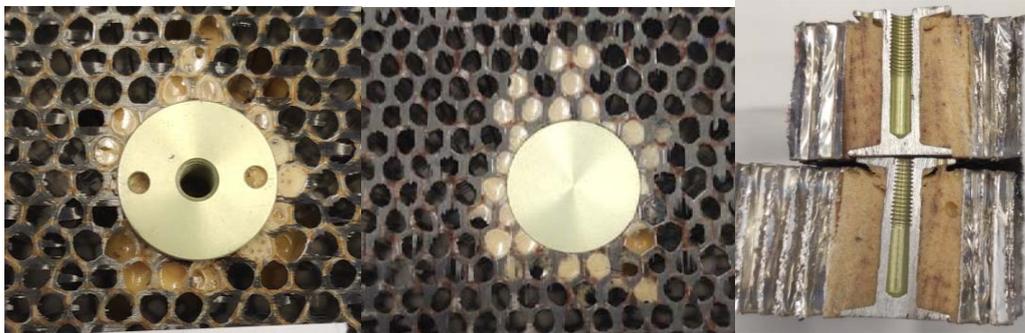


Рис. 1. Внешний вид образцов для определения предела прочности при вырыве после демонтажа обшивок

В результате проведенных исследований экспериментальным методом выявлены скрытые факторы влияющие на несущую способность вставок в сотовой панели. Определены минимальные значения разрушающей нагрузки закладных элементов для заданного конструктивного исполнения. Выполнен сравнительный анализ фактических результатов испытаний с расчетными значениями. Полученные данные в результате проведенного исследования учитываются при расчетах минимального значения разрушающей нагрузки закладных элементов при проектировании и изготовлении сотовых панелей в АО «РЕШЕТНЁВ».

#### Библиографические ссылки

- 1 Н.А. Тестоедов, В.Н. Наговицин, М.Ю. Пермяков Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах. Вестник СибГАУ. Том 17, № 1, с. 200-211
- 2 О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов Экспериментальные исследования влияния клея и размеров ячейки на несущую способность трехслойных балок. Известия вузов. Северо-кавказский регион. 2012, № 2, с. 91-95

3 Р.И. Вишталов, Х.М. Муселемов, О.М. Устарханов Определение приведенных характеристик сотовых заполнителей различных форм. Вестник Дагестанского государственного технического университета, 2016, №3, с. 155-166

4 Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции: Выбор параметров проектирования. М.: Машиностроение, 1986. С. 8-9.

#### References

1 N.A. Testoedov, V.N. Nagovitsin, M.Yu. Permyakov Application of three-layer honeycomb structures in space vehicles. Bulletin of SibGAU. Volume 17, No. 1, p. 200-211.

2 O.M. Ustarkhanov, Kh.M. Muselemov, T.O. Ustarkhanov Experimental studies of the influence of glue and cell dimensions on the bearing capacity of three-layer beams. Izvestiya vuzov. North Caucasian region. 2012, no. 2, p. 91-95.

3 R.I. Vishtalov, Kh.M. Muselemov, O.M. Ustarkhanov Determination of the reduced characteristics of honeycomb cores of various shapes. Bulletin of the Dagestan State Technical University, 2016, No. 3, p. 155-166.

4 Endogur A.I., Weinberg M.V., Jerusalem K.M. Honeycomb structures: Choice of design parameters. М.: Mashinostroenie, 1986. S. 8-9.

© Удод Л. С., Милютин А. Е., 2023

УДК 621.9.047

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Н. А. Швалева<sup>1\*</sup>, А. А. Фадеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: natalyashvaleva@yandex.ru

*Рассмотрены перспективы применения импульсного напряжения для электрохимической обработки тонкостенных деталей ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: электрохимическая обработка, импульсное напряжение, тонкостенные детали*

## PROSPECTS FOR APPLICATION OF PULSED VOLTAGE FOR ELECTROCHEMICAL MACHINING OF THIN-WALLED PARTS

N. A. Shvaleva<sup>1\*</sup>, A. A. Fadeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “Krasnoyarsk machine-building plant”

29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: natalyashvaleva@yandex.ru

*The prospects for the use of pulsed voltage for electrochemical machining of thin-walled parts of rocket and space technology are considered.*

*Keywords: electrochemical machining, pulsed voltage, thin-walled parts*

Изготовление деталей с тонкостенной конструкцией получило широкое распространение в ракетно-космической отрасли. К таким деталям относят, например, вафельный фон силовых каркасных конструкций, обечаек, к которым предъявляются высокие требования к точности изготовления и массе. В настоящее время указанные детали получают методом механической обработки, а именно, фрезерованием сплошного листа. В силу особенностей тонкостенной конструкции, стенки деталей можно легко деформировать в процессе механической обработки. В последнее время развиваются прогрессивные, современные направления – электрохимические и электрофизические методы обработки.

Электрохимическая обработка (ЭХО) – это обработка, основанная на процессе анодного растворения, в которой заготовка, являющаяся анодом, и электрод-инструмент, являющийся катодом, разделены межэлектродным зазором (МЭЗ), который заполнен раствором электролита. На скорость анодного растворения металла при ЭХО влияет характер и величина технологического напряжения (тока), создаваемого используемым источником технологического напряжения (тока) [1]. Процесс ЭХО может протекать при постоянном или импульсном напряжении. При ЭХО с постоянным напряжением обработку обычно проводят с использованием сравнительно больших межэлектродных зазоров, что обеспечивает достаточно эффективное удаление продуктов обработки из межэлектродного пространства. При этом, не может быть обеспечена высокая точность обработки [2]. Это важно, при обработке тонкостенных деталей ракетно-космической техники, где важна масса изготовленной детали. При ЭХО с импульсным напряжением процесс анодного растворения металла не происходит, а электролит протекает. За счет этого межэлектродный зазор освобождается от продуктов обработки и вы-

равнивается температура электролита, что способствует поддержанию расчетного режима ЭХО и повышаются технологические показатели процесса. При ЭХО с импульсным напряжением по сравнению с обработкой постоянным напряжением происходит: уменьшение зазоров за счет лучшего удаления продуктов обработки из МЭЗ; снижение потерь напряжения в приэлектродных слоях за счет меньшего газонаполнения МЭЗ в период протекания тока; уменьшения пассивации при анодном растворении и увеличение выхода по току за счет лучшего удаления продуктов обработки; рост плотности тока в момент подачи импульса, что повышает качество поверхности.

В настоящее время ЭХО с импульсным напряжением получает все большее распространение. Известны результаты исследований и моделирования процесса ЭХО с импульсным напряжением, в том числе в пакетах программного обеспечения для анализа, решения и моделирования методом конечных элементов [2- 3]. Так, авторами работы [2] было изучено влияние формы импульсов напряжения на процесс ЭХО с использованием ПО Comsol Multiphysics. Авторами установлено, что влияние формы импульсов на удаление продуктов обработки и локализацию зоны анодного растворения проявляется только при малой частоте следования импульсов, которая не может быть реализована на практике. Кроме того, для повышения точности обработки ЭХО следует проводить, сочетая наложенные короткие импульсы различной формы и организацией промывки МЭЗ, при меньших средних значениях напряжения.

Анализируя работы [5, 6], можно сказать, что основными параметрами импульсов тока ЭХО являются: плотность тока (фарадеевского тока и токов заряжения-разряжения двойного электрического слоя), длительность импульсов напряжения, скважность импульсов. С повышением длительности импульса вследствие увеличения газонаполнения рост количества электричества, расходуемого на растворение металла, замедляется. При меньших МЭЗ это замедление начинается раньше, возникает неравномерность съема металла. Поэтому, важно определять значение длительности импульса для конкретного случая ЭХО, в зависимости от давления в МЭЗ, формы импульса, амплитуды напряжения, выхода по току и ряда других факторов ЭХО. Определяя оптимальные параметры можно добиться высокой производительности процесса ЭХО с достаточно высокой точностью обработки поверхности.

Известен метод комбинированной ЭХО. Авторами [7] было предложено вначале формировать полость детали посредством использования импульсов, а затем производить растворение при постоянном токе до необходимой глубины. Этот метод обеспечил возможность увеличения локализации растворения при сохранении высокой скорости процесса. Переходя от ЭХО при постоянном напряжении к импульсным режимам и регулируя параметры импульсов, можно управлять локализацией процесса растворения металла.

Изучая вопрос ЭХО с применением импульсного напряжения, были определены основные параметры, влияющие на процесс. Вид напряжения ЭХО следует выбирать в зависимости от заданной точности конкретной детали, условий проведения процесса. Для получения глубоких полостей деталей тонкостенной конструкции перспективнее использовать комбинированную ЭХО, что обеспечит наибольшую точность обработанной поверхности и большую производительность процесса, что важно в условиях производства. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время все больше изучаются различные аспекты ЭХО с импульсным напряжением, и находят все большее применение на практике.

### Библиографические ссылки

1. Давыдов А.Д., Волгин В.М., Любимов В.В. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования // Электрохимия. 2004. Т.40. N 12. С. 1438-1480.
2. Влияние формы импульсов напряжения на электрохимическую обработку / В. М. Волгин, В. Н. Сидоров, Т. Б. Кабанова, А. Д. Давыдов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 611-618. DOI 10.24412/2071-6168-2021-10-611-619. EDN VCNOZJ.
3. Пеньков А. А. Электрохимическая обработка с импульсами наносекундной длительности// Известия Тульского государственного университета. Технические науки, no. 2, 2022, pp. 236-240.
4. Li S, Ming P, Zhang J, Zhang Y, Yan L. Concurrently Fabricating Precision Meso- and Microscale Cross-Scale Arrayed Metal Features and Components by Using Wire-Anode Scanning Electroforming Technique. *Micromachines* (Basel). 2023 Apr 29;14(5):979. doi: 10.3390/mi14050979. PMID: 37241603; PMCID: PMC10223039.

5. Любимов В. В., Волгин В. М., Красильников В. П. Теоретическое исследование параметров импульсов тока при электрохимической обработке с микро- и нанопараметрами // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №2.

6. В.В. Любимов, В.М. Волгин, И.В. Гнидина. Обоснование выбора длительностей импульсов напряжения при электрохимической размерной микрообработке нано и микросекундными импульсами // ЭОМ. 2019. №5.

7. Редкозубова О. О. Импульсная анодно-катодная электрохимическая микрообработка при наличии изолирующих масок // Электронная обработка материалов 2002. № 6(218). С. 39-42.

+\*/

### References

1. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical dimensional processing of metals: the process of shaping // *Elektrokhimiya*. 2004, vol. 40. No. 12. P. 1438-1480. (In Russ.)

2. Effect of the shape of voltage pulses on electrochemical machining / V. M. Volgin, V. N. Sidorov, T. B. Kabanova, A. D. Davydov // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2021. № 10. S. 611-618. DOI 10.24412/2071-6168-2021-10-611-619. EDN VCNOZJ. (In Russ.)

3. Pen'kov A. A. Electrochemical treatment with nanosecond pulses // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 2, 2022, pp. 236-240. (In Russ.)

4. Li S, Ming P, Zhang J, Zhang Y, Yan L. Concurrently Fabricating Precision Meso- and Microscale Cross-Scale Arrayed Metal Features and Components by Using Wire-Anode Scanning Electroforming Technique. *Micromachines* (Basel). 2023 Apr 29;14(5):979. doi: 10.3390/mi14050979. PMID: 37241603; PMCID: PMC10223039.

5. Lyubimov V. V., Volgin V. M., Krasil'nikov V. P. Theoretical investigation of the current pulses parameters in electrochemical machining with micro and nanoparametric // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2019. №2. (In Russ.)

6. Lyubimov V.V., Volgin V.M., Gnidina I.V. *Obosnovanie vybora dlitel'nostei impul'sov napryazheniya pri elektrokhimicheskoi razmernoj mikroobrabotke nano i mikrosekundnymi impul'sami* [Substantiation of the choice of voltage pulse durations in electrochemical dimensional micromachining with nano- and micro-second Pulses] // EOM. 2019. №5. (In Russ.)

7. Redkozubova O. O. *Impul'snaya anodno-katodnaya elektrokhimicheskaya mikroobrabotka pri nalichii izoliruyushchikh masok* [Pulse anodic-cathode electrochemical micromachining in the presence of isolation masks] // *Elektronnaya obrabotka materialov* 2002. № 6(218). P. 39-42. (In Russ.)



**Секция**

**«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»**

УДК 629.783

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СИГНАЛЫ В КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

К. С. Алилекова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ksenijalilekova@mail.ru

*В данной статье рассматриваются различные виды воздействия окружающей среды на сигналы в космической навигации и связи и способы ослабления их влияния.*

*Ключевые слова: космический аппарат (КА), космическая навигация и связь, ионосфера, тропосфера, многопутность, магнитное поле, радиационное поле.*

## ENVIRONMENTAL IMPACT ON SIGNALS IN SPACE NAVIGATION AND COMMUNICATIONS

K. S. Alilekova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ksenijalilekova@mail.ru

*This article discusses various types of environmental effects on signals in space navigation and communications and ways to mitigate their influence.*

*Keywords: spacecraft, space navigation and communications, ionosphere, troposphere, multipath, magnetic field, radiation field.*

В настоящее время активно развиваются технологии космической навигации и связи. Системы, выполняющие функции осуществления космической навигации и связи, обеспечивают передачу данных и коммуникацию для многих областей, включая, например, авиацию, судоходство, транспорт, оборону. Однако, на распространение сигналов в линии Земля-Космос оказывает воздействие окружающая среда, что может привести к ошибкам в измерениях и, соответственно, может сказаться на точности навигации и связи.

Основными факторами, влияющими на качество сигналов, являются атмосфера (слои ионосферы и тропосферы), магнитное поле Земли, гравитационное поле и другие факторы. Это влияние особенно заметно на частотах от 10 ГГц и выше, а также при малых углах прихода волны (малых углах места антенны земной станции) [1].

Влияние ионосферы может проявляться в поглощении энергии, дисперсии сигнала, то есть неравномерном времени задержки в полосе, «мерцании» сигнала, что обусловлено различием среды распространения от вакуума, так как ионосфера подвержена влиянию ультрафиолетовой радиации Солнца. Применительно к рассматриваемой нами проблеме спутниковых измерений находящиеся в ионосфере свободные электроны под воздействием проходящих через ионосферу электромагнитных волн от спутника сами становятся источниками вторичных волн, которые при взаимодействии с первичными приводят к появлению результирующих волн с несколько отличной скоростью распространения, значение которой может быть как ниже, так и выше скорости света в вакууме [2]. Существуют методы, позволяющие вычислить и учесть в разрабатываемых системах космической связи задержки, полученные в связи с влиянием ионосферы.

Атмосферное влияние также оказывает слой тропосферы, отличительной чертой которого является нейтральность, то есть неионизированность. В тропосфере наблюдается влияние осадков, способных отражать сигналы. Наиболее существенное влияние тропосферы проявляется в поглощении энергии радиоволн в газах атмосферы, поглощении и деполяризации волны в гидрометеорах, особенно в дождевых осадках. В связи с этим, в большинстве моделей, предлагаемых для определения учета влияния тропосферных компонент, используется разделение на «сухую» и «влажную» среды, характеристики которых описываются показателями преломления сигнала. Суммируя задержки, получен-

ные в обеих средах, можно получить общее значение временной задержки сигнала, проходящего через тропосферу и оценить их влияние.

Вопрос технологической защиты космического аппарата (КА) встает при учете влияния на него, например, радиационного поля, проявляющегося в вакуумной среде космического пространства. Помимо этого, учитывается влияние солнечной активности на величину потоков частиц солнечных космических лучей, появление которых носит дискретный и случайный характер и проявляется в увеличении частоты их появления с увеличением солнечной активности. В работе [3] подчеркивается, что вероятность появления одного события солнечных космических лучей одинаковой величины от солнечной активности практически не зависит. Для уменьшения воздействия данных факторов используются специальные защитные экраны и фильтры, которые не позволяют радиационным лучам оказывать воздействие на электронику КА и, соответственно, снижают вероятность искажения сигналов.

Также следует учитывать влияние магнитного поля Земли. В условиях космического пространства магнитное поле имеет свойство изменчивости, что может вызывать ошибки в работе магнитных компасов и других устройств, использующих магнитное поле для ориентации [4]. Для решения этой проблемы используются специальные алгоритмы и компенсационные устройства, которые позволяют корректировать сигналы и уменьшить влияние изменчивости магнитного поля.

Помимо перечисленных факторов, существенное влияние на качество космической связи и навигации оказывает так называемая многопутность. Под этим термином понимается ситуация, когда сигнал, отражаясь от встречных объектов (например, от водной поверхности Земли), проходит расстояние большее прямого расстояния между КА и пунктом приема (наблюдающей станцией). Таким образом, появляются дополнительные погрешности, которые в конечном итоге приводят к искажениям точности измерений. В связи с изменением дальности хода сигнала, он сдвигается по фазе. Рассчитав фазовые сдвиги средствами математического анализа и моделирования, существуют методы ослабления влияния рассматриваемого фактора [5].

Космическая навигация и связь играют важную роль в современном мире, обеспечивая передачу данных и навигацию для многих отраслей экономики. Однако, системы космической навигации и связи подвержены воздействию окружающей среды. Развитие новых технологий и методов защиты поможет решить эти проблемы и обеспечить более надежную работу систем космической навигации и связи.

#### Библиографические ссылки

1. Кантор Л.Я., Тимофеев В.В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.
2. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Картгеоцентр, 2004. 355 с.
3. Шурыгин И. О. Анализ радиационной стойкости космических аппаратов связи при проектировании / И. О. Шурыгин, Е. А. Чуменко. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2016. №15 (119). С. 123-125. URL: <https://moluch.ru/archive/119/32920/> (дата обращения: 12.09.2023).
4. Широков, А. В. Влияние геомагнитной активности на работу космических систем связи и навигации / А. В. Широков, В. И. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2017. Т. 60, № 6. С. 12-18.
5. Генике А. А. Особенности учета влияния многопутности при спутниковых геодезических измерениях / А. А. Генике, Ву Ван Донг // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2004. №2. С. 3-15.

#### References

1. Kantor L.Ya., Timofeev V.V. Satellite communications and the problem of the geostationary orbit. M.: Radio and Communications, 1988. 168 p.
2. Genike A. A., Pobedinsky G. G. Global satellite positioning systems and their application in geodesy. 2nd edition, reprint, and additional M.: Kartgeocenter, 2004. 355 p.
3. Shurygin I. O. Analysis of radiation resistance of communication spacecraft during design / I. O. Shurygin, E. A. Chumenko. Text: direct // Young scientist. 2016. №15 (119). PP. 123-125. URL: <https://moluch.ru/archive/119/32920/> (accessed: 12.09.2023).
4. Shirokov, A.V. The influence of geomagnetic activity on the operation of space communication and navigation systems / A.V. Shirokov, V. I. Kuznetsov // Izvestia of Higher educational institutions. Radio electronics. 2017. Vol. 60, No. 6. pp. 12-18.
5. Genike A. A. Features of taking into account the influence of multipath in satellite geodetic measurements / A. A. Genike, Wu Wang Dong // Izvestiya vuzov "Geodesy and aerial photography". 2004. No. 2. pp. 3-15.

УДК 629.783

## СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BEIDOU И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

К. С. Алилекова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ksenijalilekova@mail.ru

*В данной статье рассматриваются системы спутниковой навигации, приводится их применение в космической связи и других областях жизни человека.*

*Ключевые слова: спутниковые навигационные системы (СНС), GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou.*

## SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS: GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU AND THEIR APPLICATION IN SPACE NAVIGATION

K. S. Alilekova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ksenijalilekova@mail.ru

*This article discusses satellite navigation systems, provides their application in space communications and other areas of human life.*

*Keywords: satellite navigation systems (SNS), GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou.*

Системы спутниковой навигации являются неотъемлемой частью современной жизни. Они позволяют определять местоположение объектов на Земле с высокой точностью и использовать эту информацию в различных областях, таких как авиация, мореплавание, транспорт, геодезия и другие. Современное разнообразие транспортных средств не меняет сути навигационной задачи: требуется обеспечить такой путь, который смог бы обеспечить наилучшие показатели качества.

Под радионавигацией понимается наука о методах и средствах получения информации о положении и движении подвижных объектов и о методах и средствах их вождения из одной точки пространства в другую по обусловленным траекториям в установленное время [1]. Для осуществления задач радионавигации применяются спутниковые навигационные системы (СНС). В системах навигации по лучу используется достаточно простой принцип, основанный на трансляции узконаправленного радиосигнала. Для навигации при помощи такой системы потребителю достаточно удерживаться в зоне приёма сигнала. Достоинство таких систем – их предельная простота, а недостатком является то, что навигация возможна только в пределах заранее заданных маршрутов [2].

В настоящее время различают несколько видов СНС, но наибольшей популярностью в применении пользуются GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, которые обеспечивают перекрытие тех областей, которые заданы параметрами системы и нуждами разработчиков. Системы отличает от других имеющихся СНС их глобальность, оперативность, всепогодность, высокая точность и эффективность [3].

GPS (Global Positioning System) – глобальная система местоопределения. Система, разработанная и эксплуатируемая Министерством обороны США. Состоит из низкоорбитальных 24 спутников, передающих сигналы на частоте более 1 ГГц и пользовательских приемников, определяющих по этим сигналам свои координаты [4]. Система GPS работает на высоте 20183 км при наклоне орбиты 55°, что не является достаточным для покрытия приполярных районов [5]. На орбите расположено 32 спутников, 24 из которых используются для обработки информации. Минимальная точность – 10 см, типичная – 6-8 м. Данная система в текущий момент времени используется в основном в гражданских целях, то есть пользователю необходимо только наличие устройства с GPS-приемником.

ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) – российская спутниковая система навигации. Система ГЛОНАСС запускает и содержит спутники на орбите высотой 19100 км с наклоном орбиты 64,8°. Такой наклон дает покрытие земного шара вплоть до полярных широт. На данный момент, в качестве передатчика и приемника информации используется 24 спутника из 25 находящихся на орбите. Точность определения координат составляет порядка 2,5 м [6]. Система ГЛОНАСС,

как и система GPS, широко используется в авиации, мореплавании, транспорте, геодезии и других сферах жизни человека.

Galileo – это европейская система спутниковой навигации, которая находится на стадии развертывания. Система Galileo состоит из 30 спутников на орбите Земли высотой 23224 км с углом наклона 56° и позволяет определять местоположение объекта с точностью до нескольких сантиметров. Цель создания данной системы в основном состоит в обособленности от существующих систем GPS и ГЛОНАСС, обеспечивая при этом высокую точность определения объектов. Как и в GPS, угол наклона не обеспечивает покрытие приполярных зон. В отличие от американской GPS и российской ГЛОНАСС, система «Галилео» не контролируется национальными военными ведомствами, однако в 2008 году парламент ЕС принял резолюцию «Значение космоса для безопасности Европы», согласно которой допускается использование спутниковых сигналов для военных операций, проводимых в рамках европейской политики безопасности.

Система BeiDou, китайской разработки, начала предоставлять глобальные навигационные услуги в 2020 году. Высота рабочей орбиты составляет 21500 км с наклоном 55°. На орбите находится 48 спутников, 45 из которых используется при обработке информации (данные на 2020 год). Точность измерения координат колеблется от 10 см до 10 м в различных областях использования. Данная система показала свои преимущества при ведении геологического и гидрологического мониторинга, предсказав крупные стихийные бедствия.

Стоит также упомянуть о существовании еще нескольких систем: IRNSS (Индия), QZSS (Япония), DORIS (Франция). Данные системы в настоящее время находятся на стадии разработки и их применение в основном планируется быть направленным на действия в нуждах страны, то есть полное покрытие земного шара не предполагается.

Из всех вышеперечисленных СНС наиболее эффективными с точки зрения общей навигации уже на протяжении десятков лет являются ГЛОНАСС и GPS. Еще в 2005 году В. С. Яценков в своей работе [7] описывал различия между этими системами как в алгоритмах формирования навигационных сигналов и применяемых системах времени и координат, так и в целостной структуре навигационного сообщения. Тем не менее, все имеющиеся СНС находят широкое применение в различных областях деятельности, а параметры систем модифицируются и дополняются.

#### Библиографические ссылки

1. Баженов А. В. Радионавигационные системы: учебное пособие / А. В. Баженов, Г. И. Захаренко, А. Н. Бережнов, К. Ю. Савченко / Под ред. А. В. Баженова. Ставрополь: СВВАИУ (ВИ). 2007. 202 с.
2. А. О. Куприянов. Глобальные навигационные спутниковые системы: учебное пособие. М.: МИИГАиК. 2017. 76 с.
3. Серапинас Б. Б. Глобальные системы позиционирования : учеб. изд. М.: ИКФ «Каталог», 2002. 106 с.
4. Леонтьев Б. К. GPS: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить. Неофициальное пособие по глобальной системе местоопределения 2006. 352 с.
5. Филатова С. Г. Радиотехнические системы: учебное пособие / С. Г. Филатова. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2018. 119 с.
6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
7. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М: Горячая линия –Телеком, 2005. 272 с.

#### References

1. Bazhenov A.V. Radio navigation systems: textbook / A.V. Bazhenov, G. I. Zakharenko, A. N. Berezhnov, K. Yu. Savchenko / Edited by A. V. Bazhenov. Stavropol: SVVAIU (VI). 2007. 202 p.
2. A. O. Kupriyanov. Global navigation satellite systems: textbook. M.: MIIGAIK. 2017. 76 p.
3. Serapinas B.B. Global positioning systems: Textbook. ed. M.: IKF "Catalog", 2002. 106 p.
4. Leontiev B. K. GPS: Everything you wanted to know, but were afraid to ask. Unofficial manual on the global positioning system 2006. 352 p.
5. Filatova S. G. Radio engineering systems: a textbook / S. G. Filatova. Novosibirsk: Publishing house of NSTU. 2018. 119 p.
6. GLONASS. Principles of construction and functioning / edited by A. I. Perov, V. N. Kharisova. 4th ed., reprint. and additional M.: Radio engineering. 2010. 800 p.
7. Yatsenkov V. S. Fundamentals of satellite navigation. NAVSTAR and GLONASS GPS systems. M: Hotline –Telecom, 2005. 272 p.

УДК 621.391

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПЕРЕКРЫТИЯ МНОЖЕСТВА ЗОН ПОКРЫТИЯ СПУТНИКА\*

К. Э. Гаипов, М. С. Козловский, В. М. Антонов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: powerscn23@gmail.com

*Предложен аналитический алгоритм определения площади покрытия и перекрытия как множества лучей одного спутника, так и с множеством других. Значения площадей покрытия позволяют рассчитать среднюю абонентскую нагрузку исходя из плотности населения обслуживаемой области, а площадь перекрытия учесть зоны повышенных помех.*

*Ключевые слова: спутник, угол апертуры, габаритные точки, площадь покрытия, интерференция.*

## ANALYTICAL ALGORITHM FOR DETERMINING THE OVERLAPPING AREA OF MULTIPLE SATELLITE COVERAGE ZONES

K. E. Gaipov, M. S. Kozlovsky, V. M. Antonov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: powerscn23@gmail.com

*An analytical algorithm is proposed for determining the coverage area and overlap of both many beams of one satellite and with many others. The values of the coverage areas make it possible to calculate the average subscriber load based on the population density of the serviced area, and the coverage area to consider areas of increased interference.*

*Keywords: satellite, aperture angle, dimensional points, coverage area, interference.*

Одной из основных задач операторов спутниковой связи является расчёт средней абонентской нагрузки и распределение трафика. Эта нагрузка зависит от времени суток и плотности населения в обслуживаемой спутником области. Зная площадь покрытия, можно рассчитать эту нагрузку как для отдельного спутника, так и для всей спутниковой группировки. Границы покрываемой области в главной мере зависят от расположения космического аппарата на орбите, направляющего вектора ретрансляции сигнала и его угла апертуры. На основе этих параметров авторами предложен аналитический алгоритм определения площади покрытия и перекрытия множества лучей спутника. В основу разработанного алгоритма легли методы рассмотренные в [1-3]. В существующем программном обеспечении [4-5] отсутствуют методы автоматического расчёта площадей пересечения зон радио покрытия. Для подтверждения работоспособности алгоритма был смоделирован случай перекрытия лучей трёх произвольно расположенных спутников с различными друг от друга углами апертуры (рис. 1, 2).

Результаты и входные данные представлены в таблице 1.

Все полученные площади лежат в пределах значения площади Земли и могут быть использованы для вычисления средней абонентской нагрузки обслуживаемого региона.

Предложенный аналитический алгоритм выдаёт достаточно близкие к реальным значения и вполне может быть применим на практике.

---

\* Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

На основе результатов моделирования можно сделать выводы:

1. Алгоритм позволит вычислить площадь покрытия луча ИСЗ при произвольном направлении ретранслятора, угла апертуры и положении в космическом пространстве.

2. Алгоритм позволит вычислить площадь пересечения нескольких лучей как одного ИСЗ вида HTS, так и перекрытие множества других ИСЗ.

Следующим этапом совершенствования алгоритма потенциально является определение пресечения зоны покрытия отдельных континентов, стран, регионов.

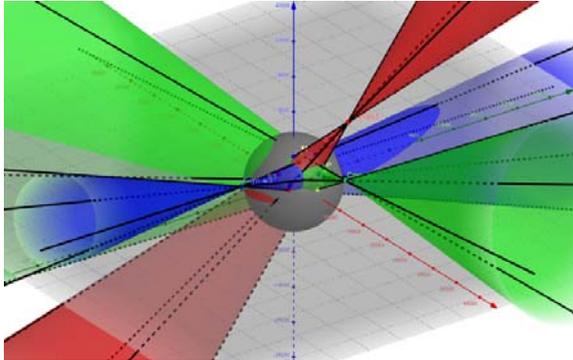


Рис. 1. Перекрытие сигналов трёх спутников

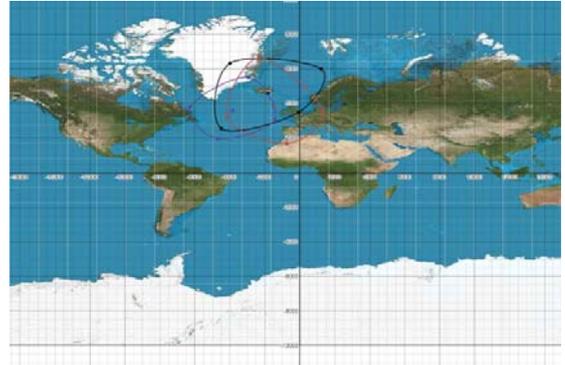


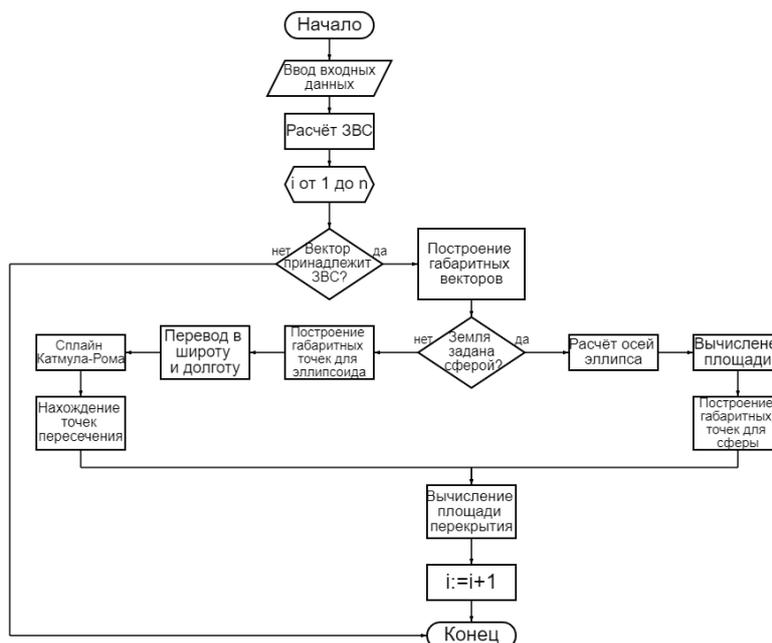
Рис. 2. Перекрытие трёх зон на проекции Меркатора

Таблица 1

Таблица с результатами расчётов

№ ИСЗ	Входные данные			Площадь покрытия км <sup>2</sup>	Площадь перекрытия км <sup>2</sup>
	Угол апертуры град.	Координаты (x; y; z) км	Направляющий вектор (x; y; z) км		
1	12	(8587.82; 2301.1; 11379.66)	(-2366.83; -1783.53; -3793.22)	$1.212 \cdot 10^7$	$6.858 \cdot 10^6$
2	36	(11218.19; 0; 4761.84)	(-3919.69; -550.88; -913.83)	$1.899 \cdot 10^7$	
3	16	(8143.25; -14104.52; 6913.21)	(-1922.73; 5302.11; -1724.32)	$1.712 \cdot 10^7$	

Составлена блок-схема алгоритма:



### Библиографические ссылки

1. Hughes, Gary B.; Chraibi, Mohcine (2012). Calculating ellipse overlap areas. *Computing and Visualization in Science*, 15(5), 291–301. doi:10.1007/s00791-013-0214-3
2. Elliptic Quaternions and Generating Elliptical Rotation Matrices // ResearchGate URL: [https://www.researchgate.net/publication/291975543\\_Elliptic\\_Quaternions\\_and\\_Generating\\_Elliptical\\_Rotation\\_Matrices](https://www.researchgate.net/publication/291975543_Elliptic_Quaternions_and_Generating_Elliptical_Rotation_Matrices) (дата обращения: 14.09.2023).
3. Measure of overlap between two arbitrary ellipses on a sphere // The Royal Society Publishing URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2021.0807> (дата обращения: 14.09.2023).
4. Ansys Government Initiatives [электронный ресурс]. URL: <https://www.agi.com/> (дата обращения: 05.09.2023).
5. Информационный космический центр «Серверная корона» [электронный ресурс]. URL: <https://spacecenter.ru/Software.htm> (дата обращения: 05.09.2023).

### References

1. Hughes, Gary B.; Chraibi, Mohcine (2012). Calculating ellipse overlap areas. *Computing and Visualization in Science*, 15(5), 291–301. doi:10.1007/s00791-013-0214-3
2. Elliptic Quaternions and Generating Elliptical Rotation Matrices // ResearchGate URL: [https://www.researchgate.net/publication/291975543\\_Elliptic\\_Quaternions\\_and\\_Generating\\_Elliptical\\_Rotation\\_Matrices](https://www.researchgate.net/publication/291975543_Elliptic_Quaternions_and_Generating_Elliptical_Rotation_Matrices) (access date: 09/14/2023).
3. Measure of overlap between two arbitrary ellipses on a sphere // The Royal Society Publishing URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2021.0807> (access date: 09/14/2023).
4. Ansys Government Initiatives [electronic resource]. URL: <https://www.agi.com/> (access date: 09/05/2023).
5. Information space center “Server Crown” [electronic resource]. URL: <https://spacecenter.ru/Software.htm> (access date: 09/05/2023).

© Гаипов К. Э., Козловский М. С., Антонов В. М., 2023

УДК 662.629.05

## ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ БОРТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ СПУТНИКОВ АО «ИСС»

Е. Н. Голубев

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: gen@iss-reshetnev.ru.

*В настоящем докладе рассматривается развитие интегрированных средств диагностики бортового компьютера космических аппаратов АО «ИСС» и их использование для выявления и парирования отказов бортового комплекса управления КА.*

*Ключевые слова: бортовая цифровая вычислительная машина, система управления, верификация алгоритмов управления, отработка систем управления, методики испытаний.*

## ON-BOARD COMPUTER INTEGRATED DIAGNOSTICS FOR JSC «ISS – RESHETNEV COMPANY» SATELLITES

E. N. Golubev

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: gen@iss-reshetnev.ru.

*This paper presents development of on-board computer diagnostics for the satellites manufactured by JSC «ISS – Reshetnev Company» and how to use such tools to detect failures and recover OCS operation*

*Index terms: On-Board Computer, control system, verification of control algorithms, tests of control systems, test methods.*

При проектировании бортовых компьютеров разных поколений, являющихся ядром системы управления космических аппаратов АО «ИСС», всегда предусматривались интегрированные средства диагностики. Причем вначале были разработаны обширные тесты для заводской отладки аппаратуры бортовых компьютеров при наземных испытаниях, которые затем использовались с небольшими изменениями также в процессе полета на орбите.

Необходимость включения в состав бортового компьютера средств тестирования вызвана высокой и постоянно повышающейся степенью интеграции аппаратуры бортового компьютера. Это связано с тем, что выведение сигналов из микросхем для контроля в процессе испытаний является практически невозможным. Поэтому решение тестовых задач становится одним из основных способов проверки компьютера. Для этого в компьютер встраивается дополнительная аппаратура. При этом, практически, больших дополнительных затрат оборудования не требуются из-за наличия резерва элементов в микросхемах [1].

В обобщенном виде состав и последовательность тестов компьютера показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Состав и последовательность тестов компьютера

Перечисленные тестовые проверки необходимы как при проведении квалификационных испытаний компьютера, так и при заводских испытаниях прибора, так как ускоряют и упрощают процесс проверки, особенно при таких испытаниях как климатические, механические, на электромагнитную совместимость [2].

В то же время тестовые проверки, предназначенные для отладки аппаратуры в процессе наземной квалификации и приемки, не являются оптимальными для проверки и диагностики аппаратуры бортового компьютера в полете. Причина заключается в том, что спроектированные и отобранные для космических условий эксплуатации микросхемы практически не выходят из строя при летной эксплуатации, кроме возникновения некоторых явлений типа парируемых сбоев и устранимых отказов.

Имеется ряд критических свойств, параметров, характеристик микросхем, которые могут подвергаться деградации в заданных условиях полета. Они определяются как по результатам квалификации микросхем, так и по результатам летной эксплуатации. Встроенные средства диагностики должны выявлять и помогать парировать частичные отказы и сбои, связанные с явлениями, обусловленными воздействием условий космического полета.

По многолетнему опыту летной эксплуатации и исходя из особенностей микроэлектронной технологии, наиболее частым сбоям и частичным отказам под воздействием факторов космического пространства подвергаются элементы вычислительной системы, работающие в динамическом режиме и содержащие чувствительные схемы запоминания данных, показанные в таблице 1.

Таблица 1

**Элементы вычислительной системы, наиболее чувствительные к воздействию факторов космического пространства**

№ п/п	Элементы вычислительной системы	Частота появления сбоев и влияние на работу
1	Заданная в оперативной памяти структура ПЛИС FPGA	Частые сбои, приводят к нарушению работы, если не приняты меры парирования
2	КЭШ память процессора	Частые сбои, парируются в процессоре
3	Нерезервированные в микросхеме элементы (регистры) управления	Редкие сбои, могут привести к нарушению работы
4	Память контроллеров	Редкие сбои, исправляются согласно протоколу обмена
5	Оперативная память с защитой кодом Хемминга	Частые, ежедневные сбои, исправляются избыточным кодированием
6	MRAM память	Редкие сбои, исправляется избыточным кодированием
7	Интерфейсы LVDS и др.	Редкие сбои, исправляются согласно протоколу обмена

Как видно из приведенных данных, для устранения большинство из перечисленных сбойных явлений приняты проектные меры, сводящие их влияние на работу управляющей системы к минимуму. В устройствах памяти – это корректирующие коды и наличие избыточных элементов памяти, позволяющие исправить единичные ошибки данных в памяти. Ошибки в каналообразующей аппаратуре контроллеров и оконечных устройств исправляются путем выявления и повторной передачи сбойных сообщений. Однако, встроенные средства исправления ошибок парируют только одиночные сбои. При двойных и массовых сбоях возможно возникновение ошибок, автоматическое исправление которых невозможно, и необходимо вмешательство оператора для устранения аномальной ситуации.

Особым случаем является функциональная устойчивость цифровых микросхем, и в особенности ПЛИС, являющихся основой современной аппаратуры космического применения. Основным методом поддержания устойчивости их работы является избыточное резервирование цифровых структур с голосованием элементов внутри структуры микросхемы. Однако этот метод по ряду причин не дает абсолютной защиты от нарушения работы микросхем под действием внешних факторов, особенно из-за крайне плотного расположения элементов, когда нередко «пятно» наводимых помех охватывает одновременно соседние резервированные элементы. В этом случае, возможно искажение данных, для устранения которого эти данные необходимо перезаписывать заново или проводить рестарт системы для регенерации.

Диагностические средства для выявления и парирования сбоев и отказов в вычислительной системе строятся по иерархическому принципу, как показано на рисунке 2.

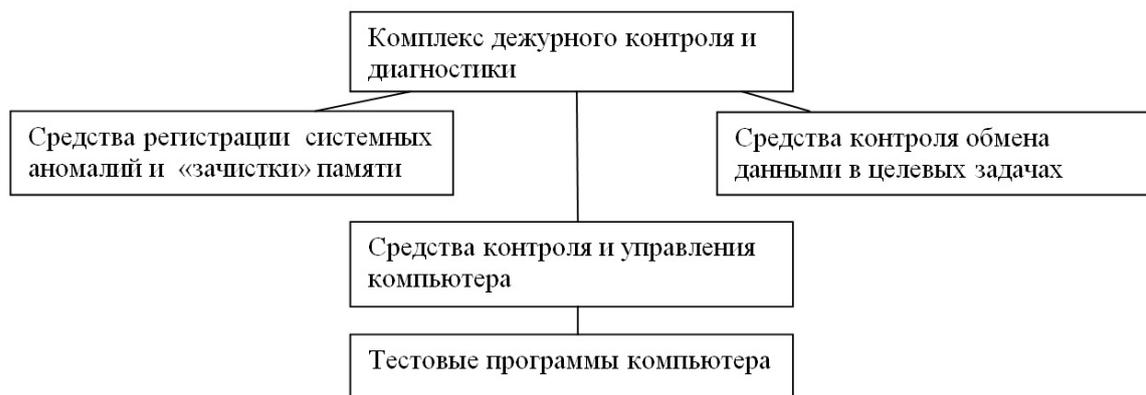


Рис. 2. Состав диагностических средств для выявления и парирования сбоев и отказов в вычислительной системе

Комплекс дежурного контроля и диагностики является организационной основой системы регистрации и парирования аномальных ситуаций на всех КА с БЦВМ. Он позволяет как регистрировать и передавать в центр управления данные по аномальным ситуациям, так и парировать их в возможных случаях. Работа комплекса дежурного контроля и диагностики является динамичной и непрерывной и выполняется с циклом программного управления аппаратом.

Средства регистрации системных аномалий и функция «зачистки» памяти входят в состав операционной системы и системных программ. Эти средства централизованно реагируют на системные исключения (программные и аппаратные прерывания), происходящие при выполнении любых программ. При этом, формируется сообщение об аномалии и делается попытка восстановления состояния задачи путем ее повтора или формируется запрос на вмешательство в случае фатальной ошибки. Фоновая задача проверки памяти путем поочередного чтения-записи во все ячейки памяти выполняет кроме проверки исправности, восстановление памяти путем использования аппаратного исправления с помощью корректирующих кодов.

Средства контроля обмена данными в целевых задачах в основном, выполняют контроль операций обмена данными в периферийных устройствах и каналах обмена, например в каналах мультиплексного обмена [3] или SpaceWire [4] и формируют данные об аномальных ситуациях при обмене. В возможных случаях производится повторный обмен данными или переключение на резервный канал обмена данными [5].

Средства контроля и управления компьютера в совокупности с тестовыми программами компьютера являются самой специфической частью диагностических средств и разрабатываются для конкретной разновидности бортового компьютера. В современных наиболее перспективных бортовых компьютерах на основе процессора Sparc [6] с внутренней сетью обмена данными наиболее специфической частью диагностической системы являются средства тестирования внутренних и внешних каналов сети SpaceWire [4-6]. Для перспективных систем с бортовым компьютером на базе процессора MIPS с развитой системой сложного программирования внутренних операций в вычислительной системе, возникла необходимость поддержания настроек системы во время функционирования с помощью специального программно-аппаратного комплекса контроля и управления компьютером. Этот комплекс позволил автоматизировать процессы восстановления системы при частичных отказах и нарушении данных в дополнение к традиционным тестовым проверкам аппаратуры компьютера.

Благодаря опыту использования в полете бортовых компьютеров в течении более 40 лет, в АО «ИСС» выработан подход к построению систем диагностики управляющих вычислительных систем, позволяющий надежно их эксплуатировать в составе спутников.

#### Библиографические ссылки

1. Голубев Е, Зырянова К. Тестирование реконфигурируемого бортового компьютера с сетью SpaceWire, РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Сборник тезисов. Сибирский государственный университет им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск), 2018.

2. Голубев Е. Аппаратно-программный комплекс для обработки бортового компьютера с процессором LEON-2 и сетью SpaceWire. РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Сборник тезисов. Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск), 2013.
3. ГОСТ Р 20570-2003
4. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization, July, 2008.
5. Голубев Е. Диагностика компьютерных сетей спутников АО «ИСС», РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Сборник тезисов. Сибирский государственный университет им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск), 2020.
6. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. 1992.

### References

1. Golubev E., Zyrianova K. Testirovanie rekonfiguriruемого bortovogo komputera s setyu SpaceWire. RESHETNEVSKIE CHTENIA. Sbornik tezisov. Sibirskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet im. akad. M.F.Reshetneva, 2018.
2. Golubev E. Apparatno-programmniy kompleks dlya obrabotki bortovogo kompyutera s protsessorom LEON2 i setyu SpaceWire. RESHETNEVSKIE CHTENIA. Sbornik tezisov. Sibirskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet im. akad. M.F.Reshetneva, 2013.
3. ГОСТ Р 20570-2003.
4. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization, July, 2008.
5. Golubev E., Diagnostics of ISS satelitte computer network RESHETNEVSKIE CHTENIA. Sbornik tezisov. Sibirskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet im. akad. M.F.Reshetneva, 2020.
6. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. 1992.

© Голубев Е. Н., 2023

УДК 378.162

## КОНЦЕПЦИЯ УМНОЙ НАУЧНО-УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПРАКТИЧЕСКОГО РАДИОМОНТАЖА В ВУЗЕ\*

Г. М. Гринберг, В. Г. Сидоров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: grinberg\_gm@mail.ru

*Проведен анализ возможностей научно-учебной лаборатории радиомонтажа при оснащении её интеллектуальной системой управления. Рассмотрены вопросы выбора оборудования и задействованных технологий.*

*Ключевые слова: учебная лаборатория, организация обучения студентов.*

## THE CONCEPT OF A SMART SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL LABORATORY FOR PRACTICAL RADIO EDITING AT THE UNIVERSITY

G. M. Grinberg, V. G. Sidorov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: grinberg\_gm@mail.ru

*An analysis of the capabilities of the scientific and educational laboratory of radio montage when equipping it with an intelligent control system is carried out. The issues of selection of equipment and technologies involved are considered.*

*Keywords: educational laboratory, organization of student learning.*

Умные системы и интернет вещей набирают все большую популярность в мире, однако для многих эти понятия связаны исключительно с какими-то интеллектуальными безделушками: интеллектуальное управление освещением, удаленное открытие замков и т.д. Но это только на первый взгляд. Реальный интернет вещей – это намного более широкое понятие. Современные smart-системы могут включать в себя сотни элементов и устройств, взаимодействующих не только с человеком, но и друг с другом. Они позволяют создавать умные системы управления, интеллектуальные производства [1].

Повышение эффективности работы промышленности за счет применения интеллектуальных электронных систем – так называемых «умных» сред (smart environments) – является одним из наиболее известных направлений технологического развития в этой сфере. На сегодняшний день существует множество концепций применения «умных» сред в различных предметных областях. Общим маркером для всех подобных проектов является использование слов «умный» и «интеллектуальный». Общая идея, стоящая за концептами «умных» систем, состоит в использовании распределенных сетей сенсоров и вычислительных устройств, взаимодействующих между собой для максимального обеспечения удобства и безопасности человека [2].

В качестве отличительных черт «умных» сред выделяются следующие: удаленный контроль устройств, коммуникация между устройствами, получение информации через «умные» сенсорные сети и ее распространение, сложный функционал устройств, «Предсказательные» способности и способности к принятию решений, развитые стандарты сети.

Наряду с широко развитыми областями применения технологий умных систем, в настоящее время получает распространение использование таких технологий в сфере образования, что является новой областью их применения [3].

---

\* Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

По многим параметрам процессы, протекающие при выполнении студентами лабораторных и практических работ, прохождения производственных практик в стенах различного рода учебных заведений среднего и высшего уровня образования, схожи с процессами на производстве.

Рассмотрим подробнее возможные области применения интеллектуальных систем на примере организации учебного/рабочего места радиомонтажника образовательного заведения:

- улучшение условий труда, контроль за выполнением норм САНПИН (освещенность, влажность, скорость движения воздуха, высота рабочей поверхности, время работы за компьютером, технические перерывы и др.);

- повышение уровня безопасности условий труда, снижение рисков получения травмы/ожогов, отравления вредными веществами, выделяемыми при работе с флюсами, очистителями и работе паяльником, оставления рабочего места без присмотра с включенной аппаратурой на длительный период времени, проверка используемых приборов, своевременная замена фильтров в дымоуловителях и др.;

- увеличения производительности за счет применения средств автоматизации, современных технологий, сокращения времени на ряд технологических операций, таких как работа с мелкими деталями, smd компонентами, применение современных программных продуктов непосредственно на рабочем месте для контроля производимых работ, быстрый поиск и доступ к любой справочной информации посредством сети Interneton-line, консультации с нужными специалистами непосредственно на рабочем месте с возможностью демонстрации возникшей «проблемы»;

- контроль доступа к рабочему месту, автоматизация учета рабочего времени, анализа причин возникновения брака или снижения качества выполняемых работ оптимизация процесса планирования и контроля работ.

Все выше описанное предназначено для повышения эффективности ручного труда и качества работы, совокупность системы отвечающей за все эти улучшения и саму рабочую область принято в литературе называть «Умным рабочим местом» (УРМ). По своей сути УРМ является программно-аппаратным комплексом, связанным с конкретным видом деятельности и учитывающим индивидуальные особенности процессов, протекающих на данном месте.

На рисунке 1 представлена фотография рабочих мест студентов в научно-учебной лаборатории (НУЛ) радиомонтажа нашего ВУЗа.



Рис. 1. Научно учебная лаборатория

Данная НУЛ была создана благодаря поддержке «Института передовых производственных технологий» в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Используя рабочие места в этой лаборатории в качестве основы для создания УРМ необходимо произвести ряд доработок. На каждое рабочее место необходимо установить персональный компьютер (ПК) как основное ядро/систему, а также дополнительную систему сбора данных на базе микроконтроллера, решающую свой круг задач. В качестве дополнительной системы можно выбрать популярные платформы Arduino или STM32. Блок-схема работы УРМ приведена на рисунке 2.

Данная сборка позволяет реализовать несколько вариантов работы УРМ. Рассмотрим один из вариантов. Различного рода датчики, размещенные на рабочем месте позволяют собирать информацию различного рода для передачи ее после преобразования в цифровую на микроконтроллер платы сбора данных. Для этого на плате сбора данных имеются собственные АЦП и ЦАП.

В случае нехватки их характеристик, возможно размещение дополнительных, более быстродействующих или с большей разрядность преобразователей в данной блок-схеме. Микроконтроллер, явля-

ья предварительной системой, по заранее заложенной в него программе определяет какие данные ему нужно передать в основное ядро сразу, а какие он может обработать самостоятельно и по результатам обработки принять решение передать полученные результаты в ядро или выдать управляющие сигналы самостоятельно на исполнительные механизмы УМР.

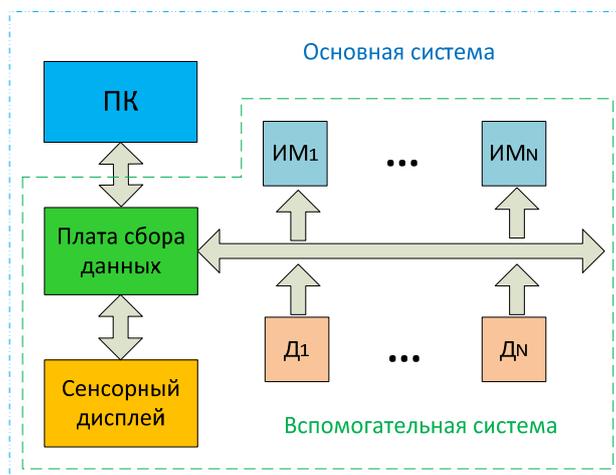


Рис. 2. Блок-схема умного рабочего места:

ПК – персональный компьютер, Д1...ДN – датчики, ИМ1...ИМN – исполнительные механизмы

Такая схема позволяет выполнять ряд задач без участия основного ядра, персонального компьютера, что значительно сократит время реакции на ситуацию. Состав датчиков для УМР может включать в себя, датчики контроля доступа, так называемые RFID метки, датчики газов/дыма, освещенности, звуковые, таймеры, веса, влажности и т.д. В качестве исполнительных механизмов выступают различного рода двигатели, реле, осветительная и сигнальная аппаратура.

Перевод рабочих мест научно-учебной лаборатории практического радиомонтажа в разряд «умных» наделит их функциями, которые позволят повысить эффективность, качество и безопасность работы студентов.

Предлагаемая концепция умного аппаратно-программного комплекса может быть применена в различных лабораториях и производственных помещениях, где есть необходимость в повышении качества и количества производимых работ и сокращении времени на работу, не связанную непосредственно с производством продукции.

### Библиографический список

1. Умные системы [Электронный ресурс]. URL: <https://center2m.ru/smart-systems?ysclid=Imtvuzoptu592101481> (дата обращения 10.09.2023).
2. В.Н. Княгинин «Умные» среды, «умные» системы, «умные» производства: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / Коллектив авторов; Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад». СПб., 2012. Вып. 4. 62 с.
3. Mikulecky P. Smart Environment for Smart Learning // 9 Int. Scientific Conference on Distance Learning in Applied Informatics (DIVAI), Slovakia, 2012. P. 213–222.

### References

1. Umnye sistemy [Elektronnyj resurs]. URL: <https://center2m.ru/smart-systems?ysclid=Imtvuzoptu592101481> (data obrashcheniya 10.09.2023).
2. V.N. Knyaginina «Umnye» sredy, «umnye» sistemy, «umnye» proizvodstva: seriya dokladov (zelenyh knig) v ramkah proekta «Promyshlennyj i tekhnologicheskij forsajt Rossijskoj Federacii» /Kollektiv avtorov; Fond «Centr strategicheskikh razrabotok «Severo-Zapad». SPb., 2012. Vyp. 4. 62 s.
3. Mikulecky P. Smart Environment for Smart Learning // 9 Int. Scientific Conference on Distance Learning in Applied Informatics (DIVAI), Slovakia, 2012. P. 213–222.

УДК 621.311.243

## РЕСУРСНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

И. О. Гущин\*, М. Е. Баранов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: 11.06.02@mail.ru

*В работе представлены основные проблемы, влияющие на солнечные панели. Также исследована деградация солнечных батарей в результате постоянного воздействия солнечного излучения.*

*Ключевые слова: излучение, деградация, солнечные элементы, устройства.*

## RESOURCE DEGRADATION OF SOLAR PANELS

I. O. Gushchin, M. E. Baranov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: 11.06.02@mail.ru

*The paper presents the main problems affecting solar panels. The degradation of solar panels as a result of constant exposure to solar radiation has also been investigated.*

*Keywords: radiation, degradation, solar cells, devices.*

Поведение солнечных элементов в радиационной среде можно описать в терминах изменений параметров выходных параметров устройств. Этот подход ограничивает понимание физических изменений, которые происходят в устройстве. Поскольку другие факторы окружающей среды могут нуждаться в рассмотрении, понимание физической модели обеспечивает основу для оценки поведения в сложной среде. Кроме того, солнечные батареи будущего станут более сложными и могут использовать материалы, на которые влияют различные аспекты радиационного повреждения. По этим причинам следует знать о процессе взаимодействия излучения с веществом и понимать физические модели, описывающие процессы [1].

Излучение, обычно представляющее интерес для изучения деградации материалов и устройств, состоит из энергичных или быстрых массивных частиц (то есть электронов, протонов, нейтронов или ионов). Источником этих частиц могут быть ускорители частиц, естественная космическая радиационная среда, ядерные реакции или вторичные механизмы, такие как комптоновские электроны, создаваемые гаммалучами. Поскольку они имеют массу, энергию, эти частицы или другие генерируемые ими частицы могут взаимодействовать несколькими способами с материалами. Доминирующими взаимодействиями являются: неупругие столкновения с атомными электронами, упругие столкновения с атомными ядрами, неупругие столкновения с атомными ядрами [2].

Основными типами явлений радиационного повреждения в твердых телах, которые представляют интерес для разработчика солнечных батарей, являются ионизация и смещение атомов.

Ионизация происходит, когда орбитальные электроны удаляются из атома или молекулы в газах, жидкостях или твердых телах. Мерилем интенсивности ионизирующего излучения является рентген. Эта единица определяется генерацией заряда  $2,58 \times 10^{-4}$  С / кг воздуха. Мера поглощенной дозы в любом интересующем материале обычно определяется в терминах поглощенной энергии на единицу массы.

Благодаря использованию концепции поглощенной дозы различные радиационные воздействия могут быть уменьшены до единиц поглощенной дозы, которые отражают степень ионизационного повреждения в интересующем материале. Эта концепция может быть применена к электронному, гамма- и рентгеновскому излучению всех энергий.

Потеря энергии быстрыми электронами и протонами, вызванная процессами столкновения с электронами поглотителя или материала мишени, составляет большую часть рассеянной энергии. Для электронов и протонов в диапазоне энергий 0,1-10 МэВ эти столкновения электронов определяют диапазон частиц в поглотителе. Несмотря на этот факт, другой тип процесса столкновения является основой для повреждения, которое постоянно разрушает кремниевые солнечные элементы в космической среде. Основой этого повреждения является смещение атомов кремния с их узлов решетки быстрыми частицами в кристаллическом поглотителе. Эти смещенные атомы и связанные с ними вакансии подвергаются другим реакциям и в конечном итоге образуют устойчивые дефекты, которые вызывают значительные изменения в равновесных концентрациях носителей и времени жизни неосновных носителей [3].

Как правило, характеристики солнечных элементов оцениваются в измерительной установке до того, как элементы поступают в ускорительную установку для облучения (протонами или электронами) и затем возвращаются в измерительную установку для повторного измерения. Тем не менее, этот «последовательный метод» требует относительно больших количеств образцов, которые могут облучаться различными количествами электронов / протонов с разными энергиями ускорения, чтобы полностью выявить деградационные свойства солнечных элементов.

Современные космические солнечные элементы с тройным переходом содержат три вида солнечных элементов, изготовленных из разных материалов, уложенных слоями.

Их поведение при разложении более сложное, чем у традиционных солнечных элементов с одним переходом, которые состоят из одного типа материала. Следовательно, требуется много дорогостоящих и трудоемких экспериментов по облучению с различным количеством электронов / протонов с диапазоном энергий [4].

Компании-производители солнечных батарей или космические агентства обычно не имеют собственных ускорителей. Вместо этого они используют специальные ускорительные установки для облучения. Такие средства обычно обращают внимание только на качества протонно-электронных пучков, такие как однородность и стабильность. В результате не было разработано никаких современных методов облучения для оценки радиационной деградации солнечных элементов [5].

#### Библиографические ссылки

1. Деградация солнечных батарей. SOLARPANEL.TODAY [Электронный ресурс]. URL:<https://solarpanel.today/degradaciya-solnechnih-paneley> Дата обращения (07.09.2023)
2. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. Радио, 1984.
3. С.П. Денисов. Ионизационные потери энергии заряженных частиц // Соровский образовательный журнал (СОЖ).- 1999, № 11, с. 90-96.
4. Ю.Е. Николаенко, Н.М. Вакиев, С.И. Круковский, В.Ю. Ерохов, И.И. Мельник, И.Р. Завербный. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // Энергетическая микроэлектроника НПП "Карат Львовская политехника". Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 2001. № 3, с. 21-30.
5. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики: учебник. М.: ИНФРА-М, 2007. 278 с.

#### References

1. Degradation of solar panels. SOLARPANEL.TODAY. Available at: <https://solarpanel.today/degradaciya-solnechnih-paneley> (accessed 07.09.2023)
2. Zee S.M. Physics of semiconductor devices. M.: Sov. Radio, 1984.
3. S.P. Denisov. Ionization energy losses of charged particles // Sorovsky educational journal (SOZH). 1999, No. 11, p. 90-96.
4. Yu.E. Nikolaenko, N.M. Vakiev, S.I. Krukovsky, V.Yu. Erokhov, I.I. Melnik, I.R. Zaverbny. State and development trends of solid-state photoconverters of solar energy // Energy microelectronics NPP "Karat Lviv Polytechnic". Technology and design in electronic equipment. 2001. No. 3, p. 21-30.
5. Bystritsky G.F. Fundamentals of energy: textbook. M.: INFRA-M, 2007. 278 p.

УДК 621.3.064.43

## ПРИНЦИПЫ ГАШЕНИЯ ДУГИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

И. О. Гушин\*, С. В. Харлашина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: 11.06.02@mail.ru

*В работе представлены основные методы гашения электрической дуги и их принципы. Все нижеперечисленные проблемы могут существенно осложнить и замедлить проведение наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов (СЭП КА) и даже привести к отказу различных подсистем СЭП КА.*

*Ключевые слова: методы гашения дуги, автоматический выключатель, вакуумный выключатель, дугогасительный контакт.*

## PRINCIPLES OF ARC EXTINSION OF A CIRCUIT BREAKER

I. O. Gushchin, S. V. Kharlashina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 11.06.02@mail.ru

*The paper presents the basic methods of extinguishing an electric arc and their principles. All of the problems listed below can significantly complicate and slow down ground tests of spacecraft power supply systems and even lead to failure of various subsystems of the spacecraft power supply systems.*

*Keywords: arc extinguishing methods, circuit breaker, vacuum circuit breaker, arc extinguishing contact.*

К основным методам гашения дуги относятся механический, магнитный, гашение дуги с узкой щелью и сеточный метод гашения дуги. Рассмотрим каждый из методов отдельно [1].

Механическое гашение электрической дуги осуществляется удлинением ее посредством увеличения расстояния между контактами. Этот способ нашел применение в аппаратах с ручным приводом, например в выключателях управления, контроллерах управления, а также реле.

Газоразрядная дуга под действием магнитного поля, создаваемая магнитной дутьевой катушкой, последовательно соединенной с контактом, удлиняется под действием электромагнитной силы и задувается в дугогасительную крышку, состоящую из твердой среды, и находится в фазе с твердой средой. При контакте дуга охлаждается и гасится [2].

Способ гашения дуги с узкой щелью под действием электродвижущей силы магнитного поля, образуемой дугой, заключается в том, что дуга может удлиниться и войти в узкую щель дугогасящего кожуха, а несколько продольных щелей могут разделить дугу на несколько сегментов, а при контакте с твердой средой дуга быстро гаснет. Эта конструкция в основном используется в контактах переменного тока.

Сеточный метод гашения дуги: при размыкании контактов образующаяся дуга под действием электрической энергии проталкивается в группу металлических решеток и разделяется на несколько сегментов. Каждая из изолированных металлических сеток эквивалентна. Для одного электрода имеется множество анодных и катодных падений напряжения. Для дуг переменного тока вблизи катода диэлектрическая прочность 150–250 В возникает, когда дуга пересекает ноль, поэтому дугу невозможно поддерживать и гасить. Поскольку эффект гашения дуги от сетки намного сильнее, чем у постоянного тока, приборы переменного тока часто используют сетку для гашения дуги [2].

Рассмотрим принцип гашения дуги вакуумным выключателем. В момент отключения вакуумного выключателя из-за наличия емкости между двумя контактами пробой изоляции между контактами вызывает возникновение вакуумной дуги. Благодаря форме и структуре контакта столб вакуумной дуги быстро диффундирует в область вакуума за пределами столба дуги. Когда прерываемый ток приближается к нулю, температура и давление дуги между контактами резко падают, вследствие чего дуга не может поддерживаться и гасится. В течение нескольких мкс после гашения дуги уровень

сопротивления давлению вакуумного зазора между двумя контактами быстро восстанавливается [3]. При этом контакты достигли определенного расстояния, которое выдерживает высокое восстанавливающееся напряжение. Поэтому после того, как общий ток достигнет нуля, дуга не загорится повторно и не погаснет.

Принцип гашения дуги предохранителем высокого падения напряжения: в ситуациях высокого напряжения и сильного тока в выключателях часто используются более сложные методы и конструкции для гашения дуги, в то время как высоковольтным предохранителям нужен только очень простой шланг, чтобы плавно и хорошо добиться гашения дуги. Основная причина – да: во-первых, ток предохранителя при падении высокого напряжения не очень велик. Создаваемая дуга не очень большая. Во-вторых, для гашения дуги используется воздух. Это немного похоже на принцип гашения дуги воздушного выключателя [4]. Это просто другая структура.

Оценим влияние электрической дуги на контакты автоматических выключателей. Наиболее ответственной частью токоведущей цепи автоматических выключателей являются контакты. При номинальных токах до 200 А в автоматических выключателях применяется одна пара контактов, которые для увеличения дугостойкости могут быть облицованы металлокерамикой.

Большие номинальные токи требуют применения в автоматических выключателях двухступенчатого контакта типа перекачиваемого моста или пары основных и дугогасительных контактов. Основные контакты автоматических выключателей облицовываются либо серебром, либо металлокерамикой (серебро, никель, графит). Дугогасительный неподвижный контакт покрывается металлокерамикой СВ-50 (серебро, вольфрам), подвижный СН-29ГЗ. В автоматических выключателях применяется металлокерамика и других марок.

В автоматических выключателях на большие номинальные токи применяется включение нескольких параллельных пар основных контактов.

В быстродействующих автоматических выключателях с целью уменьшения собственного времени применяются исключительно торцевые контакты, имеющие малый провал [5]. Контакты изготавливаются из меди и поверхности касания подвергаются серебрению. В связи с ростом номинального тока и относительно высоким сопротивлением контактов автоматических выключателей, в настоящее время, проводятся работы по искусственному охлаждению контактов с помощью жидкости. Такое решение задачи позволяет сохранить малую массу и быстродействие автоматического выключателя и увеличить длительный ток с 2500 до 10 000 А.

### Библиографические ссылки

1. Л. И. Евминов, Г. И. Селиверстов. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учебно-методическое пособие. Гомель, 2016. ISBN 978-985-535-309-7
2. Таев И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М., «Энергия», 1973.
3. ГОСТ 17703-72 «Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия. Термины и определения».
4. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции для системы электропитания космического аппарата. Н.В. Штабель, Е.А. Мизрах, А.В. Ушаков // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. (09–12 нояб.2016, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 1. 676 с.
5. Сливков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М. : Атомиздат, 1972. 304 с.

### References

1. L. I. Evminov, G. I. Seliverstov. Relay protection and automation of power supply systems. Educational and methodological manual. Gomel, 2016. ISBN 978-985-535-309-7
2. Taev I. S. Electrical contacts and arc extinguishing devices of low voltage devices. M., "Energy", 1973.
3. GOST 17703-72 "Electrical switching devices. Basic concepts. Terms and Definitions".
4. System for monitoring leakage currents and insulation resistance for the spacecraft power supply system. N.V. Stabel, E.A. Mizrakh, A.V. Ushakov // Reshetnev Readings: materials of the XX Anniversary International. scientific-practical conf. (November 09–12, 2016, Krasnoyarsk): at 2 o'clock / under general ed. Yu. Yu. Loginova; Sib. state aerospace univ. Krasnoyarsk, 2016. Part 1. 676 p.
5. Slivkov I. N. Electrical insulation and discharge in a vacuum. M.: Atomizdat, 1972. 304 p.

УДК 004.896

## КОРРЕКЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М. Е. Иванов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mixa2000.m2@yandex.ru

*В данной статье повествуется о проблемах и возможностях, связанных с разработкой алгоритма коррекции систем автоматического управления, которая предполагает использование компьютерных и математических моделей для автоматизации проектирования систем управления беспилотным аппаратом.*

*Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), переходной процесс, модель, автоматизированная система управления, алгоритмы искусственного интеллекта, беспилотный аппарат.*

## CORRECTION OF TRANSIENT PROCESSES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS USING NEURAL NETWORKS

M. E. Ivanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mixa2000.m2@yandex.ru

*This article describes the problems and opportunities associated with the development of an algorithm for correcting automatic control systems, which involves the use of computer and mathematical models to automate the design process of control systems for unmanned vehicles.*

*Keywords: artificial intelligence (AI), transient process, model, automated control system, artificial intelligence algorithms, unmanned aerial vehicle.*

Проектирование систем автоматического управления связано с множеством проблем и компромиссов и ключевым моментом является коррекция полученной системы. Так как, продумывая принцип работы устройства, основной задачей является выполнение поставленных задач, сначала оно, скорее всего, будет неустойчиво, так как для его работы требуется обеспечение определенной частоты сопряжения, где при изменении частоты система будет оказывать противодействие такому изменению, стараясь вернуться в изначальное положение, что есть устойчивое состояние системы. Вопрос приведения системы в устойчивое состояние с учетом современных технологий можно переложить с человека на компьютер при помощи технологий программирования нейронных сетей [1].

Приведение системы автоматического управления из неустойчивого состояния в устойчивое называется коррекцией. Процесс коррекции заключается в расчете и последующем анализе внутренних и внешних воздействий. Находится передаточная функция системы, строятся частотные характеристики и, исходя из полученной информации, проектируется корректирующее устройство. При помощи моделирования находится переходной процесс. Корректирующее устройство состоит из резисторов конденсаторов и индуктивностей, реализующих типовые звенья, которых в структуре корректирующего устройства обычно от двух до четырех. Задача типового звена корректирующего устройства вносить изменения в частотные характеристики системы управления, обычно задерживая, или ослабляя сигнал ошибки системы на диапазоне частот в области частоты сопряжения.

Методики, по которым производится коррекция, известны для большинства систем и требований, известные методы обладают своими недостатками, все из них в процессе коррекции обеспечивают устойчивость с определенным запасом, что дает чуть худшие параметры быстродействия. Нейронная сеть представляет собой компьютерную модель, основанную на последовательности нейронов, со-

единенных между собой синапсами. Машина, запрограммированная подобным образом, обретает в некотором смысле способность анализировать и запоминать различную информацию, и впоследствии, воспроизводить ее из своей памяти [2]. Определив тип корректирующего устройства, параметры определяющие воздействие на переходной процесс ограничиваются свойствами его элементов.

Для решения поставленной задачи потребуются два этапа. На первом этапе программным путем из математической модели устройства находится график логарифмической частотной характеристики, исходя из которого, первая нейронная сеть определяет вид корректирующего устройства. На втором этапе из модели строится переходной процесс, по которому вторая нейросеть методом подбора находит значения индуктивности сопротивления и емкости для элементов корректирующего устройства, удовлетворяющие заданным требованиям. Учитывая, что в производстве для элементов корректирующего устройства используются ряды номиналов соответствующие международному стандарту *IEC*, расчет значительно упрощается.

Процесс создания данной программы заключается в построении модели, расчета ее характеристик, и обучения двух нейронных сетей. Все данные операции способно проводить программное обеспечение *Simintech*. Где первая задача решается за счет стандартного набора функций, а за обучение и применение нейросетей отвечает специализированная библиотека. К тому же так как *Simintech* подходит и для применения классических методов разработки систем автоматического управления, это означает, что с его помощью можно подготовить массив данных необходимый для обучения нейросетей, и запустить ее совместно с моделью системы управления [3].

Таким образом, в результате такая программа способна значительно упростить процесс коррекции системы автоматического управления, а также улучшить показатели быстродействия относительно классических методов коррекции. Разработка может полностью проводиться на отечественном программном обеспечении *Simintech*. Начальную модель системы управления подключают к субмодели программы коррекции в результате работы, которой получают значения соответствующие типу корректирующего устройства, и значениям индуктивности сопротивления и емкости составляющих его элементов

### Библиографические ссылки

1. Методика построения нейросетей / А.А. Алейников, А.С. Кобелева. // Специальная техника и технологии транспорта. 2023. № 17. С. 331-335.
2. Моделирование систем и алгоритма управления напряжением при помощи нейросети / Д.О. Иванова, Я.А. Брюхин, Е.С. Леонтьева, Д.В. Тишкин, Н.Б. Нагаев // Научно-технологические приоритеты в развитии агропромышленного комплекса России. Материалы 73-й Международной научно-практической конференции. 2022. С. 41-46.
3. Доверительные оценки показателей качества решения задачи классификации нейросетью в случае малых выборок / С.Ю. Гуськов, В.В. Лёвин // Нейрокомпьютеры и их применение. 2016. С. 31-32.

### References

1. A.A. Aleynikov, A.S. Kobeleva. [Methodology for constructing neural networks]. *Special equipment and transport technologies*. 2023. No. 17. pp. 331-335 (In Russ.).
2. D.O. Ivanova, Y.A. Bryukhin, E.S. Leontyeva, D.V. Tishkin, N.B. Nagaev. [Modeling of systems and voltage control algorithm using a neural network] *Scientific and technological priorities in the development of the Russian agro-industrial complex*. [Materials of the 73rd International Scientific and Practical Conference]. 2022. pp. 41-46.
3. S.Y. Guskov, V.V. Levin. [Confidence estimates of quality indicators for solving a classification problem using a neural network in the case of small samples] *Neurocomputers and their application*. 2016. pp. 31-32.

УДК 004.896

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

М. Е. Иванов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mixa2000.m2@yandex.ru

*В данной статье повествуется о проблемах и возможностях, связанных с применением нейросетевых алгоритмов, для моделирования внутренних и внешних процессов при проектировании систем управления беспилотным аппаратом.*

*Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), компьютерная модель, переходный процесс, автоматизированная система управления, алгоритмы искусственного интеллекта, беспилотный аппарат.*

## APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN SIMULATION OF MATHEMATICAL CONTROL SYSTEMS

M. E. Ivanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mixa2000.m2@yandex.ru

*This article describes the problems and opportunities associated with the use of neural network algorithms for modeling internal and external processes when designing control systems for an unmanned vehicle.*

*Keywords: artificial intelligence (AI), computer model, transient process, automated control system, artificial intelligence algorithms, unmanned aerial vehicle.*

Процесс моделирования системы автоматического управления включает в себя несколько этапов, первым этапом является постановка цели управления, затем необходимо определить внешние и внутренние процессы, происходящие в системе, затем проводится этап математического моделирования, где рассчитываются частотные характеристики полученной системы, по которым проводится коррекция.

После этого при помощи специализированного программного обеспечения собирается система, разработанная на предыдущих этапах. Проблемой может стать включение в систему элементов со сложной математической зависимостью, зачастую для такой зависимости известен лишь набор точек соответствующий некоторой кривой искомого процесса. В таком случае построение модели подразумевает получение формулы данной кривой, хотя для математического моделирования в любом случае необходимо получить математическую формулу, на этапе компьютерного моделирования становится возможным применить нейронную сеть вместо математической формулы [1]. Для многих случаев применение нейросетевой модели не будет оптимально, так как ее практически невозможно включить в классические методы математического расчета. Однако для компьютера нейросеть является обычной математической моделью, вследствие чего при прямом расчете переходного процесса для программ, выполняющих моделирование системы управления, нейросеть представляется как обычный элемент системы. Возможность проектирования такой модели представлена в среде программного моделирования *Simintech* где при помощи соответствующей библиотеки можно обучить и применять нейронную сеть совместно с элементами систем автоматического управления. Что крайне удобно, так как не придется модернизировать, или задействовать несколько программ для применения нейронной сети совместно с моделью системы автоматического управления.

Нейронная сеть обучается по принципам математической оптимизации. Этот процесс проходит в течение большого числа итераций. Случайно заданные коэффициенты веса для синапсов нейронной сети, по заданной величине шага по градиенту изменяются в направлении наилучшего результата. Желаемый результат, задается в форме массива информации совместно с отметками об ожидаемой реакции нейросети при соответствующих входных значениях. Таким образом, нейросеть способна при помощи своей структуры и определенных при обучении весовых функций между синапсами, выдавать значение на выходе похожее на то, что было задано на этапе ее обучения [2]. Что позволяет достичь минимального расхождения между исходными материалами для обучения и результатом ее работы.

Обученная нейронная сеть возвращает значения приближенные к процессу, по которому изначально были сняты замеры, целью нейросети является заполнение промежутков данных между измеренными точками, преимуществом такого метода является то, что с его помощью можно моделировать нелинейные зависимости, функции высоких степеней, а также функции с большей размерностью. При достаточной плотности точек данных, на которых проводится обучение, можно достичь высокой точности соответствия между исходным процессом и его моделью получаемой с помощью нейронной сети. Следует учесть, что в таком варианте полученная система не будет линейна, так как значения каждый раз будут генерироваться аналогичными тем, что были использованы при обучении, но не с помощью формулы кривой.

Недостатком такого метода является то, что нейронная сеть корректно работает только в пределах информации, использованной при обучении. Так для математического выражения пределом может быть бесконечность, где все значения будут предсказуемо задаваться в соответствии с формулой, в любой точке. В случае нейросетью значения в модели будут исходить от величин весовых связей между ее нейронами, полученных при обучении. Так как при обучении зачастую невозможно включить весь диапазон процесса, то вне его сложно предсказать, как себя будет вести такая модель [3].

Таким образом, вместо подбора сложного полинома или программирования нелинейности, в моделировании можно применить обученную на массиве данных, полученных на замерах исходного процесса, нейронную сеть. Заполнение интервалов времени между измеренными точками процесса включаемого в компьютерную модель будет проводиться на основе выходных данных нейросети. Основным недостатком будет то, что неизвестно как нейросеть будет себя вести вне диапазона данных, используемых для обучения. Однако для такой модели график искомого процесса будет применим аналогично математическому выражению.

### Библиографические ссылки

1. О моделировании булевых функций нейросетями / С.А. Чихачев // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2023. № 10. С. 233-234.
2. Решение задачи прогнозирования с использованием нейросети *anfis* / О.П. Солдатова, Д.И. Кривякин // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017). Труды Международной научно-технической конференции. 2017. С. 402-404.
3. Моделирование процессов контроля и восстановления элементов системы связи на основе нейросетей / Е.В. Хохлов, В.И. Пузынин // Нейрокомпьютеры и их применение. XVII Всероссийская научная конференция. Тезисы докладов. 2019. С. 108-110.

### References

1. S.A. Chikhachev [About modeling Boolean functions with neural networks] *Modern technologies and scientific and technical progress*. 2023. No. 10. pp. 233-234.
2. O.P. Soldatova, D.I. Krivyakin [Solution of the forecasting problem using the *anfis* neural network] *Perspective information technologies (PIT 2017)*. [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. 2017. pp. 402-404.
3. E.V. Khokhlov, V.I. Puzynin [Modeling the processes of monitoring and restoring elements of a communication system based on neural networks] *Neurocomputers and their application*. [XVII Russian Scientific Conference]. 2019. pp. 108-110.

УДК 629.7.01

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

О. В. Крашенинникова, В. Г. Сидоров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: olesya.krash@mil.ru

*В данной работе рассматриваются перспективы развития малых космических аппаратов в современном мире, приведены примеры их применения в различных областях науки. Причислены преимущества малых космических аппаратов над крупными спутниками.*

*Ключевые слова: малые космические аппараты, спутники, перспективы развития космических аппаратов, научные исследования.*

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SMALL SPACECRAFT

O. V. Krasheninnikova, V. G. Sidorov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: olesya.krash@mil.ru

*This paper examines the prospects for the development of small spacecraft in the modern world, provides examples of their application in various fields of science. The advantages of small spacecraft over large satellites are listed.*

*Keywords: small spacecraft, satellites, prospects for the development of spacecraft, scientific research.*

В современном мире малые космические аппараты [1] играют важную роль в научных исследованиях. Малыми спутниками считаются космические аппараты весом менее 500 кг, пример такого спутника изображен на рис. 1. В большинстве случаев малые космические аппараты запускаются в космос вместе с ракетой-носителем среднего или тяжелого класса в качестве попутной полезной нагрузки.

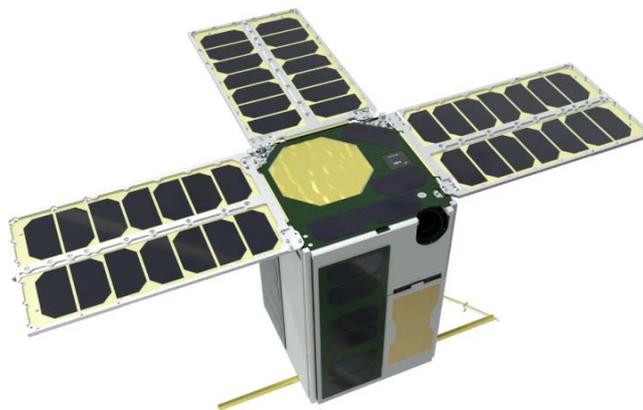


Рис. 1. Спутниковая платформа SXC12-2217 Vizard

Перед запуском малые космические аппараты проверяются на устойчивость от различных воздействий: квазистатические ускорения, случайная вибрация, ударные нагрузки, акустические нагрузки. Испытывается и сам спутник и его габаритно-массовый макет. После успешного прохождения всех

испытаний и проведения финальной проверки систем, производится установка аппарата на ракету-носитель, заправка топлива и подготовка космодрома. Далее ракета-носитель вместе малым космическим аппаратом запускается с космодрома для выполнения определенных задач в космосе.

Малые космические аппараты могут быть оснащены камерами и другими приборами для наблюдения и съемки для изучения планет, звезд и других небесных объектов, чтобы отслеживать различные аспекты космической среды, например, солнечную активность, тем самым позволяя собирать данные и делать новые открытия. Малые спутники могут сделать обзорные фотографии планеты, отображая ее поверхность, атмосферу и другие особенности. Фотографии могут быть использованы для создания детальных карт планеты. Помимо этого они могут собирать данные о составе атмосферы планеты, температуре и давлении. Эти измерения необходимы для определения климата и анализа изменений в окружающей среде.

Малые космические аппараты используются для телефонной связи, передачи данных и доступа в интернет в отдаленных регионах или плохо обслуживаемых областях. Они могут быть развернуты для установления связи во время стихийных бедствий, когда обычная коммуникационная инфраструктура оказывается недоступной или поврежденной. Так же малые космические аппараты можно использовать для отслеживания и связи с транспортными средствами, такими как: самолеты, корабли и автомобили.

Малые космические аппараты требуют меньшие бюджетные затраты на их разработку, производство и запуск, по сравнению с крупными космическими аппаратами, это делает их более доступными для различных организаций, включая университеты. Малые космические аппараты могут применяться в образовательных целях для привлечения интереса обучающихся к науке. Использование малых космических аппаратов в обучении студентов способствует их активному участию в космической индустрии. Малые космические аппараты обладают большей гибкостью в планировании и проведении космических миссий. Они могут быть легко модифицированы и адаптированы под различные задачи и научные исследования. Студенты могут использовать их для тестирования новых материалов или технологий, которые могут быть полезными в космических условиях. Малые космические аппараты способствуют развитию у студентов их профессиональных навыков. Студенты учатся работать в команде, проводить научные исследования, анализировать данные и решать проблемы, связанные с запуском и управлением спутником.

Технологии, используемые в малых космических аппаратах, быстро совершенствуются. Улучшения в области миниатюризации электроники [2] позволяют создавать все более функциональные и эффективные аппараты. С развитием технологий и появлением новых коммерческих компаний в сфере космических запусков, стоимость доставки малых спутников на орбиту существенно снижается. Компании, такие как SpaceX, Planet и Rocket Lab активно работают над созданием специализированных запускных услуг и платформ для развертывания космических кластеров малых аппаратов. Благодаря компактности и недорогой стоимости малых космических спутников можно запускать много аппаратов одновременно для осуществления масштабных операций. Например, группировка спутников, созданная в рамках федеральной целевой программы комплексного развития космических информационных технологий «Сфера» [3], должна насчитывать 640 космических аппаратов. Из-за малых размеров разработка и испытания аппаратов могут быть осуществлены за более короткий промежуток времени, поэтому если аппарат, участвующий в космической миссии выйдет из строя, то можно оперативно запустить новый на замену неисправному.

Еще одним достоинством малых космических аппаратов является то, что они создают меньше радиопомех, чем крупные спутники. Это связано с несколькими причинами: малые спутники несут меньше электронных компонентов и меньше потребляют электроэнергию, что в свою очередь уменьшает количество генерируемого электромагнитного излучения; малые космические спутники работают на более высоких частотах, сокращая возможные помехи. Малые аппараты имеют более простые системы и меньше функций, что также уменьшает возможность возникновения радиопомех.

При использовании малых космических аппаратов необходимо учитывать, что такие спутники из-за своего компактного размера имеют малую массу выводимой полезной нагрузки, то есть у них есть ограничения на вместимость научного оборудования. Так же они более уязвимы к воздействию космических условий, таких как космический мусор. Малые космические аппараты становятся менее устойчивы при входе в атмосферу и при переходе между орбитами, это может привести к их потере или повреждению. Так же малые спутники зависят от постоянной связи и поддержки со стороны Земли. Это может стать проблемой при выведении аппарата на большие расстояния от Земли, особенно если связь с аппаратом прерывается. К тому же малые космические аппараты обычно имеют

ограниченный срок службы. Их аккумуляторы и солнечные батареи со временем теряют свою эффективность, это ограничивает их способность удерживать достаточно энергии для продолжительных миссий. Малым космическим аппаратам требуется регулярное техническое обслуживание.

В целом, использование малых космических аппаратов имеет большой потенциал для различных задач. Перспективы развития малых космических аппаратов связаны с их увеличивающейся доступностью, повышенными технологическими возможностями и растущими коммерческими интересами в космической отрасли. Использование малых спутников способствует привлечению и подготовке молодых специалистов в области космических исследований. Однако, необходимо учитывать ограничения и риски, связанные с этими аппаратами. Из-за небольшого размера и массы малые космические спутники имеют ограниченные возможности по носимой нагрузке, энергии и продолжительности полета.

### Библиографические ссылки

1. Малые космические аппараты новое направление космической деятельности [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/malye-kosmicheskie-apparaty-novoe-napravlenie-kosmicheskoy-deyatelnosti/viewer> (дата обращения: 05.08.2023).
2. Основные направления развития миниатюризации и микроминиатюризации РЭА [Электронный ресурс]. URL: [https://www.sinref.ru/000\\_uchebniki/04600radio/008\\_regulirovshik\\_radioaparaturi\\_gorodilin/014.htm](https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600radio/008_regulirovshik_radioaparaturi_gorodilin/014.htm) (дата обращения: 06.08.2023).
3. Сфера (целевая программа) [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера\\_\(целевая\\_программа\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_(целевая_программа)) (дата обращения: 06.08.2023).

### References

1. Malye kosmicheskie apparaty novoe napravlenie kosmicheskoy deyatelnosti. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/malye-kosmicheskie-apparaty-novoe-napravlenie-kosmicheskoy-deyatelnosti/viewer> (accessed 05.08.2023).
2. Osnovnye napravleniya razvitiya miniaturizacii i mikrominiaturizacii REA. Available at: [https://www.sinref.ru/000\\_uchebniki/04600radio/008\\_regulirovshik\\_radioaparaturi\\_gorodilin/014.htm](https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600radio/008_regulirovshik_radioaparaturi_gorodilin/014.htm) (accessed 06.08.2023).
3. Sfera (celevaya programma) Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера\\_\(целевая\\_программа\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_(целевая_программа)) (accessed 06.08.2023).

© Крашенинникова О. В., Сидоров В. Г., 2023

УДК 629.783+621.376

**ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖСПУТНИКОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ  
В ТЕРАГЕРЦОВОМ ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ\***

С. А. Минеев<sup>1\*</sup>, В. Р. Фидельман<sup>1</sup>, В. Л. Вакс<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ННГУ им. Н. И. Лобачевского  
Российская Федерация, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
<sup>2</sup>ИФМ РАН  
Российская Федерация, 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105  
\*E-mail: sergm@nifti.unn.ru

*В работе представлена концепция прототипа системы связи в терагерцовом частотном диапазоне для космических аппаратов, обеспечивающая защиту межспутникового канала связи от радиоперехвата и подавления с поверхности Земли, с возможностью синхронизации бортовых временных шкал взаимодействующих по радиоканалу КА и определения взаимного положения КА с повышенной точностью.*

*Ключевые слова: межспутниковая связь, синхронизация временных шкал, полудуплексный режим, терагерцовый частотный диапазон.*

**ORGANIZATION OF AN INTER-SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL  
IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE**

S. A. Mineev<sup>1\*</sup>, V. R. Fidelman<sup>1</sup>, V. L. Vaks<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Lobachevsky University  
23, Gagarina ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation  
<sup>2</sup>IPM RAS  
GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
\*E-mail: sergm@nifti.unn.ru

*The paper presents the concept of a prototype communication system in the terahertz frequency range for spacecraft, providing protection of the inter-satellite communication channel from radio interception and suppression from the Earth's surface, with the ability to synchronize the on-board time scales of spacecraft interacting via a radio channel and determine the relative position of the spacecraft with increased accuracy.*

*Keywords: intersatellite communication, time scale synchronization, half-duplex mode, terahertz frequency range.*

В настоящее время одной из главных проблем в области беспроводных систем связи является увеличение скорости передаваемой информации и повышение качества передаваемой информации. Согласно [1] ожидается повышение скорости передачи данных до 80 – 100 Гбит/с в беспроводных системах связи. Теорема Шеннона показывает, что скорость передачи данных увеличивается при расширении частотной полосы. Несмотря на загруженность радиочастотного спектра, остаются достаточно широкие полосы частот, которые осваиваются по мере развития технической базы: генераторов, смесителей, антенн. Поэтому для разработки высокоскоростных систем связи привлекательным является терагерцовый (ТГц) диапазон частот (100 ГГц – 10 ТГц). Преимуществами данного диапазона является его слабая загруженность, возможность выделения широких полос, упрощенная процедура выде-

---

\* Работа выполнена в рамках федеральной программы «Передовые инженерные школы», реализуемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, в подразделении «Передовая инженерная школа Университета Лобачевского» ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

ления частот. Но у этого диапазона есть свои недостатки. Основным из них является наличие в данном диапазоне вращательных спектров молекул. Это приводит к тому, что излучение терагерцевого диапазона поглощаются молекулами кислорода и водяными парами в атмосфере. Поглощительная способность водяного пара зависит от его количества и может достигать десятков децибел. Поглощение излучения данного диапазона накладывает ограничение на дальность связи. В [2] говорится о возможности получения гигабитных скоростей на расстоянии до 1 километра для городских условий. Для достижения таких расстояний необходимо осуществлять связь в окнах прозрачности, в которых поглощение энергии радиосигнала незначительно. Согласно характеристике поглощения волн в атмосфере [3], для осуществления беспроводной связи в терагерцевом диапазоне частот могут быть использованы окна прозрачности: 120 – 160 ГГц, 210 – 290 ГГц, 315 – 325 ГГц.

В межспутниковой связи важно обеспечить высокую скорость передачи данных ввиду малого времени сеанса связи между спутниками и большого объема передаваемой информации. Например, фото высокого разрешения занимает объем памяти в десятки Гб. Используемые в настоящее время К (18 – 26,5 ГГц) и Ка (26,5 – 40 ГГц) диапазоны частот насыщены сигналами многочисленных спутников связи и имеют значительные взаимные помехи, что приводит к ухудшению качества связи на дальних расстояниях. Кроме помехозащищенности, необходимо обеспечивать защиту от перехвата передаваемой в радиоканале информации, как с космических аппаратов (КА), так и с Земли. Автономное функционирование КА в составе группировки зачастую требует высокой точности определения местоположения КА на орбите и синхронизации бортовой временной шкалы с глобальным координированным временем. Поэтому возникает необходимость синхронизации бортовых временных шкал отдельных спутников в составе группировки. Обеспечение синхронизации временных шкал КА должно обеспечиваться с погрешностью менее 10 нс (соответствует погрешности менее 3 м при определении расстояния между КА).

Целью работы является создание прототипа системы связи в ТГц частотном диапазоне для КА с возможностью синхронизации их бортовых временных шкал и определения взаимного положения с повышенной точностью; обеспечение работы радиоканала в полудуплексном режиме со скоростью передачи данных до 100 Мбит/с, а также защищенности межспутникового канала связи от наблюдения и подавления с поверхности Земли.

В состав макета каналообразующей аппаратуры широкополосного канала межспутниковой связи предлагается включить два приемно-передающих блока, каждый из которых включает: приемник радиосигналов; передатчик радиосигналов; цифровую систему передачи и обработки данных; систему синхронизации временных шкал.

Приемно-передающие блоки предназначены для передачи и приема цифровой информации в результате совместной работы в полудуплексном режиме в составе радиоканала связи со следующими техническими характеристиками:

- несущая частота 118,75 ГГц;
- скорость передачи данных до 100 Мбит/с;
- выходная мощность передатчика не менее 20 мВт;
- чувствительность приемника не более -70 дБмВт;
- коэффициент усиления антенн не менее 60 дБ.

Несущая частота 118,75 ГГц выбрана вне ближайшего окна прозрачности атмосферы Земли (120 – 160 ГГц) по причине обеспечения защиты межспутникового канала связи от перехвата и подавления с поверхности Земли средствами радиоэлектронной борьбы.

Система синхронизации временных шкал предназначена для синхронизации временной шкалы ведомого приемно-передатчика с временной шкалой ведущего приемно-передатчика при работе в составе действующего макета радиоканала связи. и должна обеспечивать ошибку синхронизации временных шкал – не более 10 нс и длительность необходимого для синхронизации сеанса связи – не более 35 мс.

Кроме приемника и передатчика, в состав спутникового канала связи должна входить цифровая система для обеспечения передачи и обработки данных, в качестве которой разрабатывается контроллер на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с каналами приёма и передачи, работой которых управляет и контролирует встроенная компьютерная система на базе компьютерного модуля (ADVANTECH PCM-3365, или ADLINK CM3-BT4, или другие компьютерные модули с аналогичными характеристиками).

Для контроля и управления контроллером с помощью встроенной компьютерной системы предполагается создание пользовательского программного обеспечения, которое представляет собой инте-

рактивную компьютерную программу, работающую под управлением используемой операционной системы. Также на этапе отладки системы приема передачи предполагается создание программных отладчиков (Debugger), необходимых для отработки нормальных и критических ситуаций работы системы.

Для приема и передачи данных необходима разработка протокола, который бы обеспечивал надежную и устойчивую передачу информации. Характеристики цифровой системы приема-передающего устройства:

- пакетная передача информация;
- скорость передачи пакета – 100 Мб/с;
- длина передаваемого пакета – от 1 байта до 4 килобайт;
- объём передаваемой информации за один сеанс – до 2 Гбайт.

Предлагаемая концепция прототипа системы связи в ТГц частотном диапазоне для КА обеспечит как высокую скорость передачи данных между КА, так и защиту канала связи от радиоперехвата и подавления с поверхности Земли, что актуально для современных спутниковых систем.

### Библиографические ссылки

1. Song H.-J., Nagatsuma T.. Present and Future of Terahertz Communications // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011. Vol. 1(1), P. 256–263.
2. Pi Zh.; Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems//IEEE Communication Magazine, 2011. Vol.49, №6, p.101–107.
3. Вишнеvский В., Фролов С., Шахнович И. Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне // Электроника-НТБ, 2011. №1, с. 90-97.

### References

1. Song H.-J., Nagatsuma T.. Present and Future of Terahertz Communications // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011. Vol. 1(1), P. 256 263.
2. Pi Zh.; Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems//IEEE Communication Magazine, 2011. Vol.49, №6, p.101–107.
3. Vishnevskiy V., Frolov S., Shakhnovitch I. Radio Relay millimeter-wave Communication Systems: New Velocity Horizons//Electronics-NTB, 2011. №1, P.90-97 (in Russian).

© Минеев С. А., Фидельман В. Р., Вакс В. Л., 2023

УДК 621.396.9

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ МАЛОГО СПУТНИКА

А. В. Мусина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
 E-mail: sasha.musina15@mail.ru

*В предоставленном материале описаны системы управления ориентацией малого спутника, а также их недостатки и достоинства.*

*Ключевые слова: малый спутник, система ориентации, космический аппарат.*

## SMALL SATELLITE ORIENTATION CONTROL SYSTEMS

A. V. Musina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: sasha.musina15@mail.ru

*The provided material describes the orientation control systems of a small satellite, as well as their disadvantages and advantages.*

*Keywords: small satellite, orientation system, spacecraft.*

Интерес к малым спутникам в последнее время значительно вырос, и эта область быстро развивается. Это связано, прежде всего, с короткими сроками разработки и изготовления аппарата, а также его относительно невысокой стоимостью. Малые спутники теперь могут решать проблемы, которые раньше можно было решить только с помощью больших и дорогих аппаратов [1].

Система ориентации имеет огромное значение для достижения поставленных целей. Ею называют бортовую систему космического аппарата (КА), которая обеспечивает определенное положение осей аппарата относительно конкретных заданных направлений. Рассмотрим виды этих систем (рис. 1).



Рисунок 1 – Системы управления ориентацией

Теперь опишем каждую из них.

1. Активные системы:

- магнитные системы (токовые катушки);
- гироскопические системы (маховики, гиродины);
- реактивные двигатели.

Системы данного типа требуют затрат энергии, включают в себя датчики, вычислитель и исполнительные механизмы. Их развитие началось благодаря запуску телекоммуникационных спутников, имевших ограничения по направлению антенны. Основным способом ориентации в этом случае была стабилизация собственным вращением. Спутник, быстро вращаясь, ведет себя как гироскоп – очень долго сохраняет неизменным положение оси вращения. Их преимущества: точность, производительная ориентация, высокое быстродействие. Недостатки: разработка алгоритмов управления, высокая сложность системы.

## 2. Пассивные системы:

- гравитационные системы (специальная конструкция аппарата, гравитационная штанга)
- магнитные системы (постоянный магнит, гистерезисный стержень).

Системы данного типа не требуют затрат энергии и информационного обеспечения в процессе своей работы. Пассивные системы используют внешние по отношению к малому космическому аппарату (МКА) факторы – давление солнечного излучения, гравитационные или магнитные поля и др. [2]. Их преимущества: не требуют энергии, просты в использовании и не требуют алгоритмов. Их недостатки: низкая быстрота действия и точность, ограничение на количество режимов ориентации, требуют наличие внешних полей.

Из-за ограниченности энергетических и вычислительных ресурсов, а также малых размеров самого спутника к системам ориентации малых спутников и их конструкции предъявляются особые требования. Если этих требований нет, то использование магнитных систем ориентации возможно и целесообразно. Принцип их действия основан на взаимодействии магнитного момента спутника с внешним геомагнитным полем, в результате чего создается управляющий механический момент. Магнитные крутящие моменты могут реализовываться пассивно с помощью постоянных магнитов и стержней гистерезиса или активно с помощью токовых катушек. Такие системы конструктивно надежны и относительно просты. Возможность генерировать и контролировать магнитное поле на спутнике привела к разработке множества систем и алгоритмов, использующих магнитные моменты для управления его угловым движением.

Другой распространенный метод ориентации – использование маховиков. Достоинствами маховиков являются их высокая точность и быстрота действия. Главный недостаток небольших устройств – цена. Также, при использовании маховиков возникает проблема насыщения, то есть, маховик может достичь максимальной скорости вращения, но спутник еще не выйдет на штатный режим ориентации. В этом случае необходимо затормозить маховик и создать при этом момент, который компенсирует крутящий момент, возникающий при его торможении. Для разгрузки обычно используют магнитные катушки.

Двигательная установка также часто используется для обеспечения спутниковой ориентации. У этого метода есть один главный недостаток – использование рабочего тела. Поэтому использование двигательной установки для гашения начальной скорости после отделения от ракеты-носителя, если она велика, нецелесообразно. В этом случае можно использовать пассивные демпфирующие устройства. Однако использование магнитных катушек более эффективно [3].

Таким образом, три представленных способа ориентации спутников – маховики, двигательная установка, магнитные катушки – являются на сегодняшний день наиболее распространенными, в большинстве случаев они обязательно используются вместе.

### Библиографические ссылки

1. Абламейко С.В. Малые космические аппараты: пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютер. технологий, мех. мат. и геогр. Минск: БГУ, 2012. 159 с. [Электронный ресурс] URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/290231012.pdf> (дата обращения: 10.09.2023).
2. Гущин В.Н. Системы ориентации и стабилизации // Основы устройства космических аппаратов: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с. [Электронный ресурс] URL: <https://dwg.ru/dnl/2350> (дата обращения: 12.09.2023).
3. Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Ролдугин Д.С., Иванов Д.С. Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. 366 с. [Электронный ресурс] URL: <https://keldysh.ru/e-biblio/ovchinnikov/> (дата обращения: 14.09.2023).

### References

1. Ablameyko S.V. Small spacecraft: a manual for students of the faculties of radiophysics and computers. technology, fur. mate. and geogr. Minsk: BSU, 2012. 159 p. [Electronic resource] URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/290231012.pdf> (accessed: 09/10/2023).
2. Gushchin V.N. Systems of orientation and stabilization // Fundamentals of spacecraft design: Textbook for universities. M.: Mashinostroenie, 2003. 272 p. [Electronic resource] URL: <https://dwg.ru/dnl/2350> (accessed: 12.09.2023).
3. Ovchinnikov M.Yu., Penkov V.I., Roldugin D.S., Ivanov D.S. Magnetic orientation systems of small satellites. Moscow: IPM named after M. V. Keldysh, 2016. 366 p. [Electronic resource] URL: <https://keldysh.ru/e-biblio/ovchinnikov/> (accessed: 09/14/2023).

УДК 681.513 : 629.7

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

И. В. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nazarov12000@mail.ru

*В статье рассматривается использование методов машинного зрения и нейронных сетей для автоматического распознавания космических объектов на изображениях с телескопов. Приводятся примеры применения в задачах астрономии, таких как классификация галактик и поиск экзопланет.*

*Ключевые слова: машинное зрение, компьютерное зрение, нейронные сети, космические объекты, анализ данных, распознавание образов.*

## AUTOMATIC RECOGNITION OF SPACE OBJECTS USING MACHINE VISION

I. V. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nazarov12000@mail.ru

*The article discusses the use of computer vision methods and neural networks for automatic recognition of space objects in images from telescopes. Examples of application in astronomy problems such as galaxy classification and exoplanet search are given.*

*Keywords: machine vision, computer vision, neural networks, space objects, data analysis, pattern recognition.*

Исследование космоса в наши дни сталкивается с проблемой обработки и анализа огромных объемов визуальных данных, поступающих от телескопов и других инструментов наблюдения. Число получаемых изображений космических объектов исчисляется миллионами и продолжает расти в геометрической прогрессии. Ручная классификация и изучение такого количества данных крайне трудоемки и малоэффективны. Это серьезно сдерживает научный прогресс в астрономии и космологии.

Одной из ключевых задач является автоматическое распознавание и классификация различных космических объектов на этих изображениях. Ручная классификация малоэффективна из-за огромных объемов данных. Для решения этой проблемы активно применяются методы компьютерного зрения и машинного обучения, позволяющие автоматизировать процесс анализа визуальных данных [1].

Машинное зрение – область искусственного интеллекта, изучающая методы анализа изображений. Цель – научить компьютер видеть, как человек. Современные алгоритмы машинного обучения, в том числе нейронные сети, позволяют эффективно анализировать визуальные данные и решать задачи распознавания.

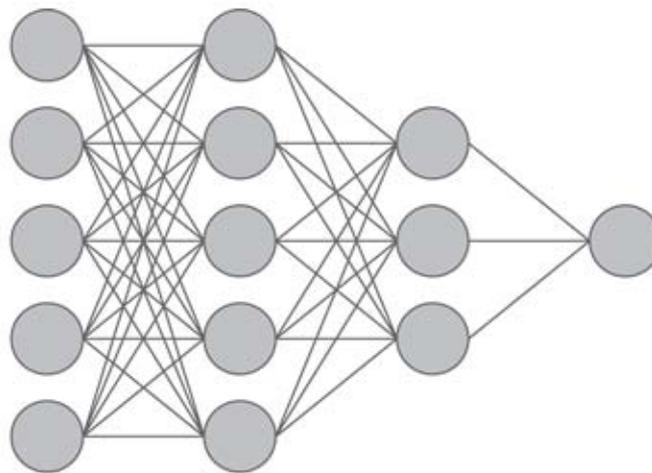
Машинное зрение применяется для распознавания различных космических объектов на снимках, что позволяет автоматизировать поиск уже известных и выявление новых объектов.

Для распознавания чаще всего используют глубокие нейросети, способные анализировать изображения и находить трудно формализуемые признаки объектов [2].

Одним из распространенных методов являются сверточные нейронные сети (CNN). Их архитектура хорошо подходит для извлечения признаков с изображений и классификации объектов по категориям. Предобученные на больших наборах данных CNN показывают высокую точность распознавания космических объектов.

Другие типы нейросетей, например, рекуррентные (*RNN*), применяются для анализа временных последовательностей изображений и выявления динамичных объектов. Автокодировщики используются для поиска аномальных объектов, не похожих на обычные звезды и галактики.

Автоматическое распознавание уже активно применяется в различных областях современной астрономии [3, 4]. Например, в 2019 году исследователи из *Google* и *НАСА* разработали алгоритм машинного обучения (рис. 1) для анализа данных космического телескопа *Kepler*.



Входной слой    Входной слой1    Входной слой2    Выходной слой

Рис. 1. Полносвязная нейронная сеть. Входные данные поступают на первый уровень, выходной генерирует прогнозы. Скрытые слои – иерархия изученных функций

Другой пример – классификация миллионов галактик по данным *SDSS* с помощью машинного зрения (рис. 2). Автоматизация позволяет быстро находить редкие типы галактик.

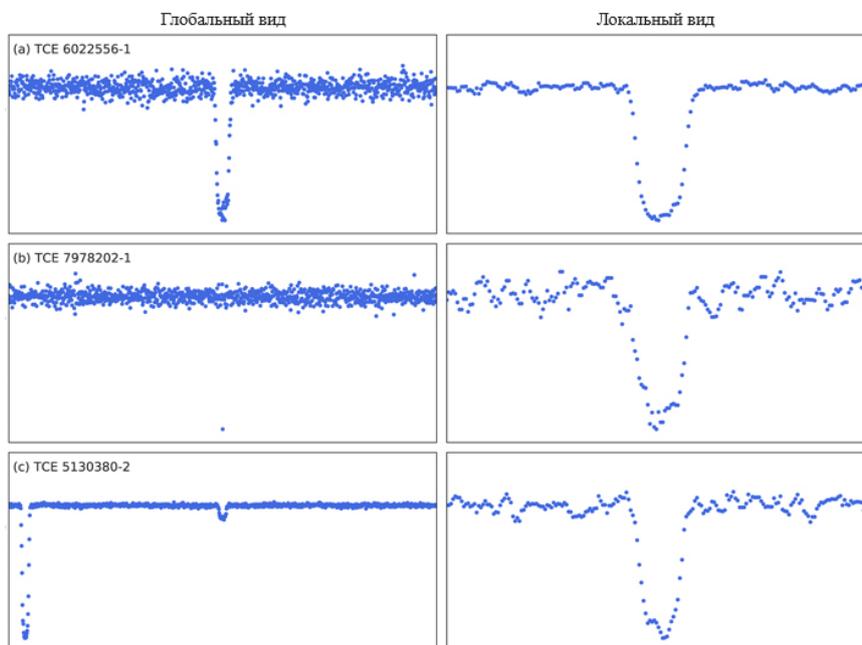


Рис. 2. Представления кривых блеска для моделей нейронных сетей:  
а – кандидат на планету; б – планета с длинным периодом;  
в – вторичное затмение.

Используя архив из 50 000 изображений, собранных *Kepler*, нейронная сеть научилась распознавать присутствие экзопланет у далеких звезд [5]. Алгоритм показал точность распознавания до 96% –

на уровне профессиональных астрономов. Это позволило значительно ускорить поиск новых экзопланет в архивах *Kepler*.

Таким образом, методы компьютерного зрения и глубокого обучения позволяют эффективно решать проблему анализа больших объемов визуальных данных в современной астрономии. Их применение существенно ускоряет научный прогресс, открывая путь к новым открытиям в исследовании космоса. Дальнейшее развитие алгоритмов машинного зрения будет и далее расширять возможности астрономии и космологии.

Однако перед практическим применением алгоритмы машинного зрения должны пройти тщательное тестирование на репрезентативных наборах данных. Необходимо оценить точность и полноту распознавания, устойчивость к шумам на изображениях, а также возможность переноса на новые типы данных.

Только после успешных испытаний на модельных задачах имеет смысл внедрять алгоритмы машинного зрения в реальные системы анализа данных телескопов. Их применение существенно ускорит научный прогресс, открывая путь к новым открытиям.

### Библиографические ссылки

1. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. Nature. 2015. Vol. 521. P. 436-444.
2. Методы компьютерного зрения / А.Н. Григорьев, В.В. Мыльников, В.Л. Арлазаров и др. М.: Физматлит, 2018. 672 с.
3. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems. 2012. T. 25. P. 1097-1105.
4. Shallue C.J., Vanderburg A. Identifying exoplanets with deep learning: A five-planet resonant chain around Kepler-80 and an eighth planet around Kepler-90. The Astronomical Journal. 2018. T. 155. No. 2. P. 94.
5. Dieleman S., Willett K.W., Dambre J. Rotation-invariant convolutional neural networks for galaxy morphology prediction. Monthly notices of the royal astronomical society. 2015. T. 450. No. 2. P. 1441-1459.

### References

1. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. Nature. 2015. Vol. 521. P. 436-444.
2. Metody komp'yuternogo zreniya [Computer vision methods]. / A.N. Grigor'ev, V.V. Myl'nikov, V.L. Arlazarov i dr. M.: Fizmatlit, 2018. 672 p.
3. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems. 2012. T. 25. P. 1097-1105.
4. Shallue C.J., Vanderburg A. Identifying exoplanets with deep learning: A five-planet resonant chain around Kepler-80 and an eighth planet around Kepler-90. The Astronomical Journal. 2018. T. 155. No. 2. P. 94.
5. Dieleman S., Willett K.W., Dambre J. Rotation-invariant convolutional neural networks for galaxy morphology prediction. Monthly notices of the royal astronomical society. 2015. T. 450. No. 2. P. 1441-1459.

© Назаров И. В., 2023

УДК 620.179

## МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. В. Назаров\*, А. В. Смирнов, Т. Г. Орешенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nazarov12000@mail.ru

*Целью исследования являлось исследование возможности мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций с использованием наномодифицированных композиционных материалов, представлен обзор существующих методов мониторинга, а также исследование эффективности композитов в качестве сенсорных элементов.*

*Ключевые слова: мониторинг, сенсоры, наномодификация, механические свойства, композиционные материалы.*

## MONITORING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES USING NANOMODIFIED COMPOSITE MATERIALS

I. V. Nazarov\*, A. V. Smirnov, T. G. Oreshenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nazarov12000@mail.ru

*The purpose of the study was to investigate the possibility of monitoring the stress-strain state of structures using nanomodified composite materials, an overview of existing monitoring methods is presented, as well as a study of the effectiveness of composites as sensor elements.*

*Keywords: monitoring, sensors, nanomodification, mechanical properties, composite materials.*

Современные железные дороги являются жизненно важной составляющей инфраструктуры во многих странах, обеспечивая эффективную транспортировку пассажиров и грузов. При этом безопасность железнодорожного движения остается одной из наиболее важных проблем. Одной из основных причин возникновения аварий на железнодорожном транспорте является деформация путей и рельсовых плетей. В связи с этим возникает необходимость в надежной системе контроля за предотказным состоянием рельсовых путей для обеспечения безопасности движения.

Деформация рельсовых путей и плетей может возникать из-за различных факторов, таких как износ материалов, температурные воздействия, статические и динамические нагрузки, а также другие внешние воздействия. Эти деформации могут привести к образованию трещин, снижению устойчивости путей и, в конечном итоге, к возникновению аварийных ситуаций. Поэтому контроль и раннее обнаружение деформаций важны для предотвращения возможных аварий и обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте.

В настоящее время существует несколько методов и способов контроля деформаций рельсовых путей. Один из распространенных подходов – это применение различных датчиков и сенсоров, установленных на путях и рельсовых плетях для постоянного мониторинга. Эти датчики обычно измеряют параметры, такие как температура, давление, деформация и напряжение. Полученные данные передаются на центральную станцию или систему, где происходит их анализ и принятие решений на основе полученных результатов.

Наиболее известные отечественные методы [1,2] основаны на измерении относительных перемещений магнитных меток, измерениях температуры, продольной и поперечной деформации рельса при помощи датчиков на основе оптических решеток Брэгга.

Также в мировом научном пространстве упоминаются системы [3-5] основанные на лазерном сканировании, акустическом сканировании, тензометрическом контроле.

Наиболее перспективным подходом к мониторингу деформации рельсовых путей является разработка, которая была представлена в Китае. Китайская система основывается на применении различных технологий, включая нанотехнологии и композиционные материалы, что позволяет достичь высокой точности и эффективности мониторинга. Данная система представляет собой устройство для контроля температурных напряжений и нагрузок в стальных рельсах. Система позволяет контролировать температурные изменения в рельсах и предупреждать о возможных проблемах с напряжениями и нагрузками, что способствует безопасному и эффективному функционированию железнодорожного пути.

В отличие от китайской системы, исследователи из научной лаборатории «Интеллектуальные материалы и системы» СибГУ им. М.Ф. Решетнёва (СибГУ) разработали усовершенствованную систему контроля предотказного состояния рельсовых плетей. Основными компонентами этой системы являются два термодатчика и датчик из наномодифицированного композиционного материала.

Тензодатчики, установленные на рельсовых плетях, реагируют на механическое напряжение при прохождении поездов. Полученные данные тензометрии и двух термодатчиков обрабатываются цифровой сенсорной системой, которая анализирует уровень деформации путей и определяет их предотказное состояние. В случае обнаружения опасной деформации система автоматически по каналу GSM данные, позволяя операторам принять меры по предотвращению аварийных ситуаций.

Научно-техническая значимость создания предлагаемой системы заключается в повышении точности мониторинга с учетом быстрых изменений напряженного состояния плетей при помощи калибровочной сенсорной системы. Инновационная значимость предлагаемой системы состоит в её способности эффективно мониторить различные плети с учетом их индивидуальных характеристик и быстро реагировать на изменения состояния плетей, что позволяет обеспечить безопасное и надежное функционирование железной дороги.

#### Библиографические ссылки

1. Постников С. Б. Железные дороги. Адаптация к переменам и новым реальностям. М.: Прометей, 2022. 350 с.
2. Tegmark Макс: Жизнь 3.0. Быть человеком в эпоху искусственного интеллекта. М.: Corpus, 2019 г. 560 с.
3. Система контроля деформации рельсовых плетей бесстыкового железнодорожного пути [Электронный ресурс]. URL: <http://allpatents.ru/mpk/B61K900/> (дата обращения: 26.08.2023).
4. Система контроля деформации рельсовых плетей бесстыкового железнодорожного пути [Электронный ресурс]. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU150721U1\\_20150220](https://yandex.ru/patents/doc/RU150721U1_20150220) (дата обращения: 29.08.2023).
5. Устройство для измерения продольных перемещений рельсовой плети железнодорожного пути [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2174082C1/ru> (дата обращения: 03.09.2023).

#### References

1. Postnikov S. B. Zheleznye dorogi. Adaptacija k peremenam i novym real'nostjam [Railways. Adaptation to change and new realities]. Moscow, Prometej, 2022, 350 p.
2. Tegmark Maks: Zhizn' 3.0. Byt' chelovekom v jepohu iskusstvennogo intellekta [Life 3.0. Being human in the era of artificial intelligence]. Moscow, Corpus, 2019, 560 p.
3. Sistema kontrolja deformacii rel'sovyh pletej besstykovogo zheleznodorozhnogo puti Available at: <http://allpatents.ru/mpk/B61K900/> (accessed: 26.08.2023).
4. Sistema kontrolja deformacii rel'sovyh pletej besstykovogo zheleznodorozhnogo puti Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU150721U1\\_20150220](https://yandex.ru/patents/doc/RU150721U1_20150220) (accessed: 29.08.2023).
5. Ustrojstvo dlja izmerenija prodol'nyh peremeshhenij rel'sovoj pleti zheleznodorozhnogo puti Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2174082C1/ru> (accessed: 03.09.2023).

© Назаров И. В., Смирнов А. В., Орешенко Т. Г., 2023

УДК 629.705 : 004.896

## **ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ В БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМОСА**

И. В. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nazarov12000@mail.ru

*В статье рассматривается роль искусственного интеллекта и машинного зрения в беспилотных космических аппаратах, подчеркивая их важность в навигации, исследовании поверхности планет, и выполнении автономных миссий.*

*Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное зрение, беспилотные космические аппараты, навигация, автономные миссии, марсоход, задержки в связи.*

## **ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE VISION IN UNMANNED VEHICLES FOR SPACE EXPLORATION**

I. V. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nazarov12000@mail.ru

*The article examines the role of artificial intelligence and computer vision in unmanned spacecraft, highlighting their importance in navigation, planetary surface exploration, and autonomous missions.*

*Keywords: artificial intelligence, computer vision, unmanned spacecraft, navigation, autonomous missions, Mars rover, communication delays.*

Исследование космического пространства в наши дни во многом осуществляется при помощи различных беспилотных космических аппаратов – спутников, зондов, роверов.

Исследование космоса всегда было одним из самых захватывающих и сложных вызовов, стоящих перед человечеством. Для того чтобы понять загадки вселенной, мы отправляем в космос различные космические аппараты, но недавние технологические достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) и машинного зрения привнесли новые перспективы и возможности в эту область.

Одним из решений является оснащение беспилотников технологиями искусственного интеллекта, позволяющими им самостоятельно анализировать данные и принимать решения. Особую роль играет интеграция систем машинного зрения [1].

Машинное зрение дает возможность беспилотным аппаратам видеть и интерпретировать окружающее пространство.

Алгоритмы компьютерного зрения могут распознавать различные объекты, оценивать расстояния до них, обнаруживать препятствия. Это критически важно для автономной навигации и научных исследований.

Машинное зрение – это область искусственного интеллекта, которая позволяет компьютерам анализировать и интерпретировать визуальные данные, такие как изображения и видео. В космических аппаратах машинное зрение используется для выполнения различных задач:

1. Навигация и посадка: для безопасной посадки на другой планете или спускаемом аппарате необходима точная навигация. Машинное зрение позволяет аппаратам определять свое положение относительно поверхности планеты и автоматически корректировать курс.

2. Изучение поверхности: с помощью машинного зрения аппараты могут анализировать поверхность планеты или спутника, находя интересные объекты, такие как кратеры, горы или признаки жизни.

3. Ориентация и монтаж оборудования: машинное зрение помогает аппаратам определять, как правильно ориентировать свои инструменты и оборудование, чтобы выполнить необходимые манипуляции, например, бурение почвы или сбор образцов.

4. Обнаружение и изучение объектов интереса: автоматический поиск и анализ объектов на поверхности планеты или в околоземном космосе позволяют исследователям быстро находить интересные явления, например, признаки воды или следы биологической активности.

В дополнение к машинному зрению, искусственный интеллект играет важную роль в беспилотных космических аппаратах [2]:

1. Автономность: ИИ позволяет аппаратам принимать решения в реальном времени на основе анализа данных и условий окружающей среды. Это делает их способными реагировать на неожиданные ситуации и избегать опасностей без необходимости связи с Землей.

2. Самообучение: аппараты могут использовать машинное обучение и нейронные сети для улучшения своих навыков и адаптации к изменяющимся условиям. Это особенно полезно в долгосрочных миссиях, где аппараты должны справляться с разнообразными задачами.

3. Анализ данных: ИИ может анализировать огромные объемы данных, собранных космическими аппаратами, и выявлять паттерны и тренды, что помогает исследователям делать новые открытия и принимать важные решения.

Примеры миссий с использованием ИИ и машинного зрения.

1. Миссия "*Curiosity*" на Марсе: Марсоход "*Curiosity*" использует машинное зрение для навигации и обнаружения научно значимых объектов на поверхности Марса. ИИ позволяет аппарату принимать автономные решения о выборе маршрута и изучении интересных мест.

2. Спутниковая миссия "*Sentinel*": Европейская космическая агентство запустило миссию "*Sentinel*", в которой спутники оснащены машинным зрением для мониторинга изменений на Земле, таких как изменение климата, лесные пожары и наводнения.

3. Миссия "Тесла": Космический аппарат "Тесла" отправлен в космос с целью исследования астероидов. Он использует ИИ для автоматической навигации и обнаружения астероидов на своем пути.

Одной из основных проблем, с которой сталкиваются беспилотные космические аппараты, использующие искусственный интеллект и машинное зрение, является задержка в связи между аппаратом и земным контролем [3]. Когда аппарат находится на значительном расстоянии от Земли, сигналу требуется время на перемещение, что может вызвать задержки в передаче данных и команд. Это усложняет реализацию автономности и усложняет моментальное реагирование на изменяющиеся условия.

Примером, иллюстрирующим эту проблему, является миссия "*Mars Helicopter*" (Марсоход), которая стала частью миссии "*Mars 2020*". Этот марсоход был оснащен беспилотным вертолетом *Ingenuity*, который призван был выполнить первый в истории полет на другой планете. *Ingenuity* использовал машинное зрение и искусственный интеллект для навигации и выполнения автономных полетов [4].

Однако задержка в связи между Марсом и Землей составляет около 11 минут в одну сторону. Это означает, что *Ingenuity* не может получать реальную обратную связь и команды от земного контроля в режиме реального времени. Вместо этого, марсоход должен был способен принимать решения о навигации и безопасности в автономном режиме.

Миссия "*Mars Helicopter*" демонстрирует, как технологии искусственного интеллекта и машинного зрения могут помочь преодолеть эту проблему задержки в связи и сделать космические аппараты более независимыми и автономными в исследовании космоса [5].

В заключении, искусственный интеллект и машинное зрение стали незаменимыми инструментами в беспилотных аппаратах для исследования космоса. Они позволяют аппаратам выполнять сложные задачи, такие как навигация, изучение окружающей среды и обнаружение научно значимых объектов. Кроме того, искусственный интеллект делает аппараты более автономными и способными реагировать на изменяющиеся условия без постоянной связи с Землей.

С развитием технологий искусственного интеллекта и машинного зрения можно ожидать, что беспилотные космические аппараты будут продолжать играть важную роль в расширении наших знаний

о вселенной и решении глобальных научных и технологических задач, связанных с космическим исследованием.

### Библиографические ссылки

1. Sutton, R. S., & Barto, A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. MIT Press. 2018. P. 108.
2. Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., van den Driessche, G., ... & Hassabis, D. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, 529(7587), 2016. P. 484-489.
3. Williams, D., & Ripsman, N. Advances in Space Biology and Medicine. Volume 9. From the Eye of the Storm: Regional Conflicts and the Philosophy of Peace. Springer. 2019. P. 96.
4. Russell, S. J., & Norvig, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson. 2016. P. 33-37.
5. Mueller, M., Dueck, D., Kangasraa, J., & Kuehlmann, A. Machine learning for satellite image analysis: An overview. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 28(9), 2018. P. 2446-2467.

### References

1. Sutton, R. S., & Barto, A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. MIT Press. 2018. P. 108.
2. Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., van den Driessche, G., ... & Hassabis, D. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, 529(7587), 2016. P. 484-489.
3. Williams, D., & Ripsman, N. Advances in Space Biology and Medicine. Volume 9. From the Eye of the Storm: Regional Conflicts and the Philosophy of Peace. Springer. 2019. P. 96.
4. Russell, S. J., & Norvig, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson. 2016. P. 33-37.
5. Mueller, M., Dueck, D., Kangasraa, J., & Kuehlmann, A. Machine learning for satellite image analysis: An overview. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 28(9), 2018. P. 2446-2467.

© Назаров И. В., 2023

УДК 629.783

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИЕМА АЛЬМАНАХА СИСТЕМЫ ГЛОНАСС ПО КОДОВЫМ СИГНАЛАМ ПРИ ДЕГРАДАЦИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ\*

К. Р. Плыкин<sup>1</sup>, М. М. Валиханов<sup>1</sup>, А. Н. Верещагин<sup>1</sup>, А. С. Пустошилов<sup>1</sup>, И. А. Лубкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ

Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 28

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

Email: KPlыkin@sfu-kras.ru, MValihanov@sfu-kras.ru

*При использовании сигналов с частотным разделением системы ГЛОНАСС независимо от размеров орбитальной группировки (ОГ) время приема альманаха составляет не более 5 минут. Использование предлагаемого алгоритма распределения строк в сигналах с кодовым разделением позволяет сократить прием альманаха в несколько раз, в том числе при деградации ОГ*

*Ключевые слова: ГЛОНАСС, орбитальная группировка, сигналы с кодовым разделением, альманах, псевдокадр, алгоритм распределения строк.*

## INVESTIGATION OF ALMANAC RECEPTION TIME DURING GLONASS ORBITAL GROUPS DEGRADATION WITH AN ALGORITHM FOR LINE DISTRIBUTION IN PSEDOFRAMES IN NEW SIGNALS

K. R. Plykin<sup>1</sup>, M. M. Valikhanov<sup>1</sup>, A. N. Vereshagin<sup>1</sup>, A. S. Pustoshilov<sup>1</sup>, I. A. Lubkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Engineering Physics and Radioelectronics SibFU

28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Email: KPlыkin@sfu-kras.ru, MValihanov@sfu-kras.ru

*When using GLONASS frequency division signals, regardless of the size of the orbital constellation, the almanac reception time will be 5 minutes. New code division signals when using the row distribution algorithm can reduce it by several times, but with the degradation of the orbital constellation, the reception time may vary depending on the situation.*

*Keywords: GLONASS, orbital constellation, code division signals, almanac, pseudoframe, algorithm for distribution of rows in a pseudoframe.*

На сегодняшний день происходит модернизация системы ГЛОНАСС путем выведения новых типов космических аппаратов с кодовым разделением сигналов. В этих сигналах используется другой формат передачи данных, который позволяет существенно быстрее принимать альманах на стороне пользователя, в сравнении с частотным видом разделения. Формат включает в себя организацию псевдокадров (ПСК, период повторения оперативной информации), который в зависимости от типа кодового сигнала может меняться в достаточно широких пределах от 6 до 180 секунд. Для каждого КА и типа кодового сигнала ПСК могут быть рассчитаны независимо, что позволяет гибко распределять цифровую информацию (ЦИ), тем самым ускоряя время приема альманаха в любой точке земного шара. Алгоритм формирования и заполнения таких кадров был разработан в рамках магистерской диссертации по исследованию передачи ЦИ для новых сигналов в диапазонах L1, L2, L3 [1]. Проведенные исследования не затрагивали проблему деградации ОГ системы ГЛОНАСС, в которых отсутствуют часть КА.

Целью работы является проведение анализа времени приема альманаха при различных деградациях (сокращениях) ОГ системы ГЛОНАСС. В качестве деградации будет выбран критерий отсутствия

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

КА в различных плоскостях ОГ (нумерация плоскостей является условной). Будет рассмотрено несколько составов ОГ:

- 1) 24 КА – полный состав, далее ОГ<sub>24</sub> (альманах полного состава был взят с [2]);
- 2) 23 КА – отсутствует один КА в первой плоскости (ОГ<sub>23</sub>);
- 3) 22 КА – отсутствуют по одному КА в первой и во второй плоскостях (ОГ<sub>22</sub>);
- 4) 21 КА – отсутствуют по одному КА в каждой плоскости (ОГ<sub>21</sub>);
- 5) 20 КА – в первой плоскости отсутствуют два КА, в двух других по одному (ОГ<sub>20</sub>).

Подробное описание принципа моделирования времени приема альманаха приведен в [1]. Здесь тезисно опишем основные пункты моделирования. Используются четыре программы:

1. Формирования последовательностей (алгоритм распределение строк в псевдокадрах – исходные данные (ИД) для формирования псевдокадров с ЦИ [4]);
2. Имитирования формирования ЦИ (генерирует ПСК с ЦИ на основе ИД);
3. Моделирования приема ЦИ (имитирует прием ЦИ на всей земной поверхности);
4. Визуализации данных (позволяет наглядно проанализировать время приема альманаха на карте).

Каждая программа генерирует ИД для работы следующей, в порядке их перечисления. Моделирование приема альманаха проводилось со следующими параметрами (указаны только основные):

- 1) альманах для каждой ОГ формировался путем удаления КА из стандартной ОГ<sub>24</sub>;
- 2) всего используются четыре типа сигналов L1OC, L1SC, L2SC, L3OC. Каждый сигнал может находиться в одной из четырех групп (группа позволяет распределить в пределах одного КА по сигналам однотипную ЦИ так, чтобы строки в один момент не повторялись, такой подход позволяет ускорить время приема альманаха);
- 3) сигналы группируются следующим образом – группа из двух сигналов: L3OC и L1SC, группа из трех сигналов: L3OC, L1SC и L2SC, группа из четырех сигналов: L3OC, L1SC, L2SC и L1OC;
- 4) время передачи сигналов L1OC, L1SC, L2SC составляет две секунды, а для L3OC – три [3];
- 5) путем моделирования было определены значения ПСК для сигнала L3OC составляет 10 строк (30 секунд), а для L1OC, L1SC, L2SC 13 строк (26 секунд);
- 6) каждый час ЦИ повторяется (т.е. информация генерируется на один час);
- 7) каждый сигнал может иметь эпизодическую информацию (ЭИ), которая равномерно распределена по ПСК в течении часа;
- 8) карта для приема альманаха формировалась по широте от -70 до 70 градусов с шагом 2, а по долготе -180 до 180 градусов с шагом 3 – моделирование проводилась, в узлах сформированной сетки, на карте;
- 9) отсечка по углу места КА составляет 5 градусов.

На рис. 1 представлены результаты моделирования в виде графиков МО среднего и максимального времени сбора альманаха по всей модулируемой земной поверхности. В табл. 1 результаты представлены в обширном виде, где дополнительно приведено СКО для каждого моделируемого случая.

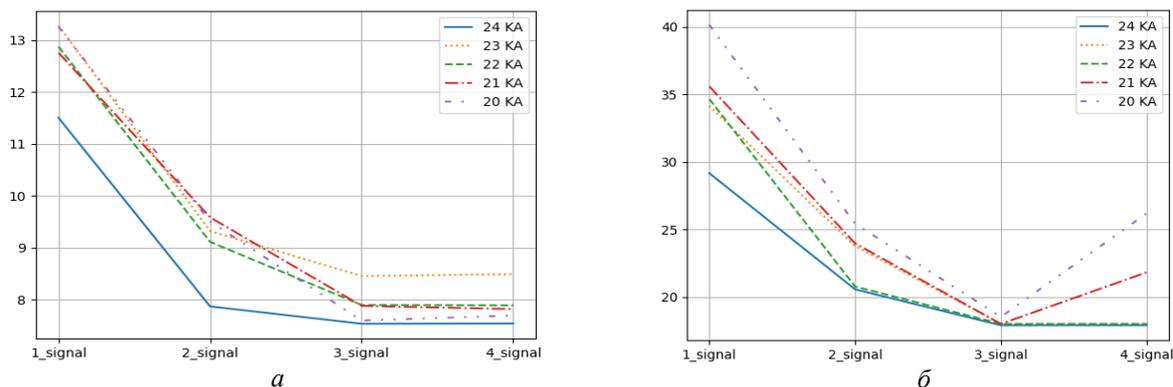


Рис. 1. МО время приема альманаха по всей поверхности земного шара при разном количестве сигналов в одной группе:

*а* – среднее время приема; *б* – максимальное время приема

Из полученных результатов видно, что при уменьшении количества КА время сбора увеличивается – это связано с тем, что источников передаваемой информации и необходимое количество строк для приема полного альманаха уменьшается. При добавлении второго сигнала в группу время сбора уменьшается примерно на 31%, независимо от рассматриваемых ОГ (в каждой ОГ выигрыш приблизительно одинаковый). Добавление в группу третьего сигнала, почти не оказывает существенного

влияния на  $OG_{24}$ , но в остальных случаях выигрыш составляет от 9% до 20%, что эквивалентно от 1 до 2 секунд. Добавление четвертого сигнала мало влияет на время сбора альманаха, но повышает надежность стабильного приема, за  $OG_{21}$  и  $OG_{20}$ , когда в некоторых промежутках времени (выявлено 0,05-0,1%), появляются точки с малым (меньше 6) количеством видимых КА. Также, при моделировании  $OG$  с малым количеством КА, чаще встречаются моменты времени, когда в определенных точках земной поверхности все находящиеся в зоне видимости КА будут передавать одинаковую ЦИ (выявлено 0,01-0,04%). Именно этим объясняется увеличение времени сбора альманаха при четырех сигналах в  $OG_{21}$  и  $OG_{20}$ .

Таблица 1

## Результаты моделирования

Вид $OG$	Кол-во сигналов в одной группе	Среднее время, сек		Максимальное время, сек	
		СКО	МО	СКО	МО
$OG_{24}$	1	0.225	11.505	4.342	29.173
	2	0.259	7.865	2.621	20.559
	3	0.076	7.531	0.708	17.895
	4	0.077	7.536	0.696	17.900
$OG_{23}$	1	0.528	13.284	3.048	34.146
	2	0.414	9.319	5.097	23.765
	3	0.162	8.452	0.012	17.999
	4	0.157	8.488	0.002	18.000
$OG_{22}$	1	0.186	12.878	3.445	34.672
	2	0.277	9.112	2.080	20.767
	3	0.219	7.893	0.000	18.000
	4	0.224	7.886	0.000	18.000
$OG_{21}$	1	0.307	12.761	2.524	35.608
	2	0.210	9.55	0.221	23.966
	3	0.104	7.876	0.000	18.000
	4	0.046	7.815	3.161	21.825
$OG_{20}$	1	0.268	13.263	7.442	40.168
	2	0.164	9.503	2.820	25.423
	3	0.182	7.593	1.970	18.519
	4	0.125	7.691	7.317	26.205

## Библиографические ссылки

1. Плыкин, К.Р. Исследование цифровой информации кодовых сигналов диапазона L1, L2, L3: магистерская диссертация: 11.04.01.04: защищена 07.2022 / Плыкин К. Р. Красноярск, 2022. 72 с.
2. Навигационная информация, эфемеридно-временные данные для КА ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/>.
3. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов Введ. 2016. Москва : Российские космические системы, 2016. 133 с.
4. Пустошилов А. С. Минимизация времени сбора альманаха ГЛОНАСС потребителями при строковой передаче цифровой информации / М. М. Валиханов, Ю. Б. Волошко, А. С. Пустошилов, С. П. Царев // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 12. С. 25–29.

## References

1. Plykin, K. R. Research of digital information of code signals of range L1, L2, L3: master's dissertation: 11.04.01.04: defense 07.2022 / Plykin K. R. Krasnoyarsk, 2022. 72 p.
2. Navigation information, ephemeris-time data for GLONASS satellites. Available at: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/>.
3. INTERFACE CONTROL DOCUMENT (ICD). General Description of Code Division Multiple Access Signal System, edition 1.0. Moscow, 2016. 133 p.
4. Pustoshilov A. S. Minimization of GLONASS Almanac Collection Time by Consumers in String Transmission of Digital Information / M. M. Valikhanov, Y. B. Voloshko, A. S. Pustoshilov, S. P. Carev // Advances in modern radio electronics. 2018. №12. P. 25 29.

УДК 620.179

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

В. Р. Тимофеев\*, Т. Г. Орешенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: vlad.tim.2001@mail.ru

*Целью работы являлось разработка математической модели прямолинейного перемещения шагающей беспилотной платформы. Основная задача исследования состояла в определении параметров и последовательности их изменения при движении объекта управления.*

*Ключевые слова:* сервоприводы, алгоритм, блок-схема.

## ALGORITHMIC CONTROL OF THE MOVEMENT OF WALKING UNMANNED VEHICLES

V. R. Timofeev\*, T. G. Oreshenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: vlad.tim.2001@mail.ru

*The aim of the work was to develop a mathematical model of rectilinear movement of a walking unmanned platform. The main task of the study was to determine the parameters and the sequence of their changes during the movement of the control object.*

*Keywords:* servos, algorithm, block diagram.

Объектом исследования являлся шагающий беспилотный аппарат с 8 сервоприводами (рис. 1), для которого было необходимо разработать математическую модель, которая впоследствии позволит оптимизировать энергопотребление и надежность разрабатываемой системы

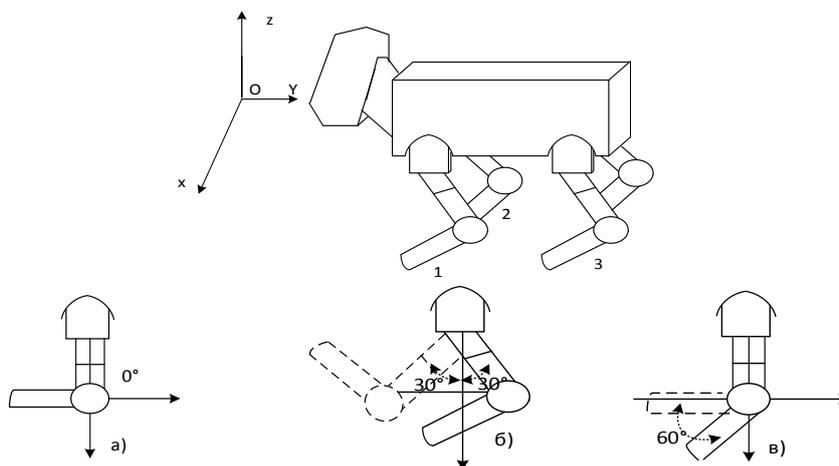


Рис. 1. Общий вид моделируемой системы

Для последовательного определения компонент математической модели необходимо определить последовательность перемещения конечностей. Двигательная функция осуществляется посредством последовательного перемещения конечностей модели, где 1–2 передняя пара и 3–4 задняя пара. Устойчивое положение достигается при приведении конечностей в активное состояние тройками, а именно 1–2–3 и 1–3–4.

Конечность состоит из отдельного корпуса, двух серводвигателей – в «плечевом суставе» и «локтевом суставе». Каждая конечность может двигаться благодаря сервоприводам, но углы движения при этом ограничены конструкцией и двигательной функцией. Максимальный угол отклонения сер-

воприводов (рисунок 1, б) составляет  $30^\circ$  в каждую сторону от состояния покоя (рисунок 1, а). Шарнир также имеет ограничение в  $60^\circ$  (рисунок 1, в).

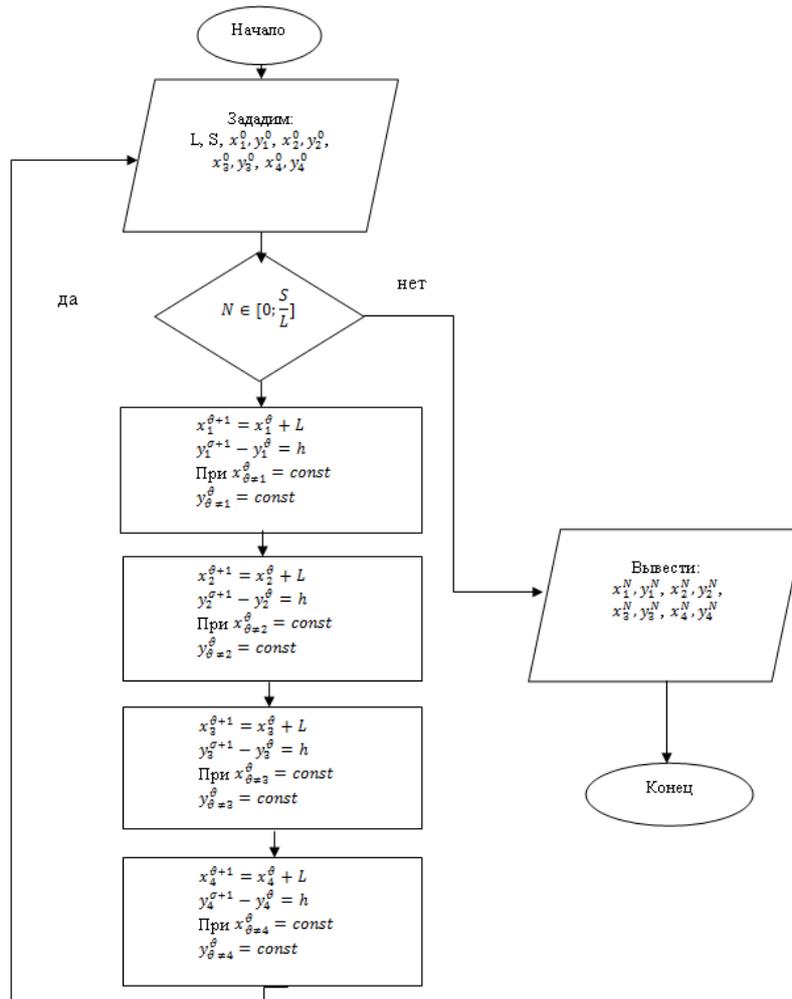


Рис. 2. Блок-схема последовательного движения

Блок-схема алгоритма управления (рис. 2), отображает последовательность выполнения действий – перемещения конечностей для формирования последовательного движения в прямом направлении, понять очередность перемещения конечностей, организовать кодирование движения на любом из языков программирования.

### Библиографический список

1. СЕРВОПРИВОД. URL: [https://iwed.science/wp-content/uploads/Seminar\\_2013.pdf](https://iwed.science/wp-content/uploads/Seminar_2013.pdf) (дата обращения 09.04.2023).
2. Закурдаев А.В. СЕРВОПРИВОД СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. URL: [https://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s47\\_007.pdf](https://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s47_007.pdf) (дата обращения 07.04.2023).
3. Поддержание положения в сервоприводе: подчинённое регулирование vs шаговый режим. - URL: [https://h.amazingsoftworks.com/ru/company/npf\\_vektor/blog/392837/](https://h.amazingsoftworks.com/ru/company/npf_vektor/blog/392837/) (дата обращения 08.04.2023).

### References

1. SERVOPRIVOD. URL: [https://iwed.science/wp-content/uploads/Seminar\\_2013.pdf](https://iwed.science/wp-content/uploads/Seminar_2013.pdf) (data obrashcheniya 09.04.2023).
2. Zakurdaev A.V. SERVOPRIVOD SISTEM AVTOMATICHESKOGO UPRAVLENIYA. URL: [https://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s47\\_007.pdf](https://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s47/s47_007.pdf) (data obrashcheniya 07.04.2023).
3. Podderzhanie polozheniya v servoprivode: podchinyonnoe regulirovanie vs shagovyy rezhim. URL: [https://h.amazingsoftworks.com/ru/company/npf\\_vektor/blog/392837/](https://h.amazingsoftworks.com/ru/company/npf_vektor/blog/392837/) (data obrashcheniya 08.04.2023).

УДК 519.852.3

## АЛГОРИТМ СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК В ПРОГРАММЕ GPSS\*

Н. В. Шпигер\*, С. Л. Белков, К. Э. Гаипов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: shpiger20032525@mail.ru

*Представленный алгоритм разработан для языка GPSS (General Purpose Simulation System), позволяющая смоделировать группировку спутников для дистанционного зондирования земли, чтобы рассмотреть спутниковую систему и оценить её работу.*

*Ключевые слова: спутниковая связь, дистанционное зондирование Земли, распределение трафика, GPSS, группировка спутников.*

## ALGORITHM FOR CREATING AN IMITATION MODEL OF SATELLITE CLUSTERING IN GPSS PROGRAM

N. V. Shpiger\*, S. L. Belkov, K. E. Gaipov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: shpiger20032525@mail.ru

*The presented algorithm is designed for the GPSS (General Purpose Simulation System) language, which allows simulating the grouping of satellites for remote sensing of the Earth in order to examine the satellite system and evaluate its performance.*

*Keywords: satellite communication, Earth remote sensing, traffic distribution, GPSS, satellite clustering.*

В настоящее время создается много новых группировок спутников [1], которые обеспечивают широкополосную связь и передачу данных. GPSS позволяет имитировать работу данной системы [2], анализировать и предоставлять информацию об оптимизации процессов спутниковой связи [3]. Также программное обеспечение предоставляет возможность имитировать не только спутниковые группировки, но также различные системы коммутаций [4] и всевозможные имитационных моделей [5].

General Purpose Simulation System (GPSS) – это программное обеспечение, которое используется для моделирования и анализа различных систем и процессов. GPSS предоставляет средства для создания виртуальных моделей, которые позволяют имитировать работу реальных систем и проводить эксперименты с ними.

GPSS может быть использован для моделирования различных систем, таких как производственные линии, торговые сети, транспортные сети, банковские операции и спутниковых систем. Он позволяет анализировать эффективность и производительность системы, оценивать влияние изменений параметров на ее работу и прогнозировать результаты.

Динамическим элементом модели является транзакт – объект, который перемещается между статическими элементами (Блоками), воспроизводя различные события моделируемого объекта. В конце работы модели выводится статистика.

Наша задача создать алгоритм, генерирующий код для GPSS, который формируется из графов имитирующую систему коммутации. Для создания кода GPSS нам нужны вводные данные (рис. 1).

Матрица смежности. Очередь канала представляет собой матрицу смежности, где значение ячейки матрицы является размер очереди канала. Задержка канала представляет собой матрицу смежности, где значение ячейки матрицы является задержкой канала. Задержка устройства, массив со значениями задержки устройств. Маршрут, номер столбца матрицы обозначает номер узла, из которого выходят каналы, значения ячеек матрицы обозначает шанс попадания транзакта в канал. Матрица может быть трехмерной, третья координата обозначает номер маршрута. Сперва моделируется время работы симуляции, проходя по матрице коммутации, мы определяем, чем является узел.

\* Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Если это источник транзактов то сперва мы пишем блок создания транзакта. Потом мы присваиваем приоритет и номер маршрута каждому из транзактов. После в зависимости к какому маршруту принадлежит транзакт идет распределение по следующим узлам, рассматривая матрицу коммутации и маршрутов, мы определяем номер маршрута и распределение по каналам.

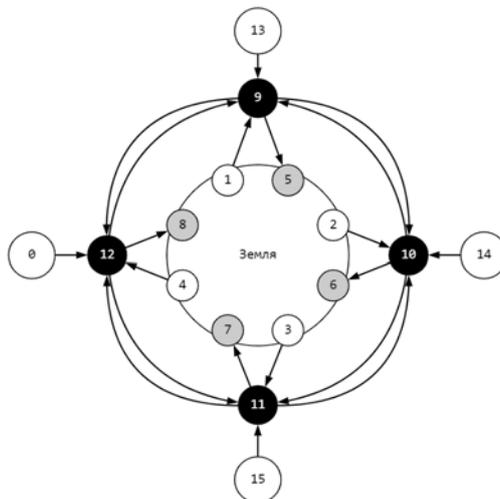


Рис. 1. Сформированный граф коммутации

Если это узел коммутации, то сперва рассматриваем сколько каналов входят в узел. Для имитации каналов задаем очередь и время задержки, после перемещаем транзакт в узел, где имитируется задержка устройства. После в зависимости к какому маршруту принадлежит транзакт идет распределение по следующим узлам. Рассматривая матрицу коммутации и маршрутов, мы определяем номер маршрута и распределение по каналам для транзакта. Если это узел потребитель, то транзакт выводится из модели, имитируя получателя. Модель может имитировать движение спутника по орбите, включая или выключая устройство спутника с задаваемыми периодами передачи транзактов и отсутствия сигнала.

Данный алгоритм можно применить для имитации систем группировок спутников дистанционного зондирования земли и оценить эффективность системы при разных параметрах.

#### Библиографические ссылки

1. Проект «Сфера» переходит к практической реализации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/>
2. Аверьянов В., Полянко С. Имитационное моделирование системы массового обслуживания на языке GPSS WORLD [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16358244>
3. Пономарев Д. Моделирование спутниковой сети в среде GPSS WORLD [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49127156>
4. Гомбо А.А. Имитационное моделирование сети Ethernet в среде GPSS WORLD [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30071875>
5. Василева С. Возможности расширенного редактора GPSS WORLD для создания учебных имитационных моделей [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23091284>

#### References

1. Project "Sphere" moves on to practical implementation [Electronic resource]. URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/>
2. Averianov V., Polynko S. Simulation modeling of a queuing system using GPSS WORLD [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16358244>
3. Ponomarev D. Modeling of a satellite network in the GPSS WORLD environment [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49127156>
4. Gombo A.A. Simulation modeling of an Ethernet network in the GPSS WORLD environment [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30071875>
5. Vasileva S. Possibilities of the advanced editor of GPSS WORLD for creating educational simulation models [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23091284>



**Секция**

**«КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»**

УДК 621.316.91

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТ ПРОТЕКАНИЯ СВЕРХТОКОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. А. Гебгардт, А. Ю. Клёнкин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: gebgardtva@iss-reshetnev.ru

*В материалах изложены результаты работ по созданию устройства коммутации нагрузки и защиты цепей электропитания от протекания сверхтоков. Данное устройство позволит обеспечить гарантированную защиту от протекания сверхтоков для всех потребителей электроэнергии на борту космического аппарата.*

*Ключевые слова: Космический аппарат (КА), система электропитания (СЭП), электронный предохранитель (ЭП), короткое замыкание (КЗ), плавкая вставка (ВП), бортовая аппаратура (БА), энергопреобразующая аппаратура (ЭПА).*

## ENSURING OF ELECTRIC POWER SUPPLY CIRCUITS PROTECTION AGAINST OVER CURRENT FLOWS ON S/C BOARD

V. A. Gebgardt, A. Y. Klenkin

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: gebgardtva@iss-reshetnev.ru

*These materials contain the results of works on the unit designing for load commutation and protection of circuits against over currents flows, and ensuring of the guaranteed protection against over current flows in electric power supply circuits for all electric power consumers on S/C board.*

*Keywords: spacecraft (S/C), Electric Power Subsystem (EPS), electronic protective device (EPD), short circuit (SC), fuse link (FL), On-board equipment (OBE), Power Conditioning Unit (PCU).*

АО «РЕШЕТНЁВ» специализируется на разработке и изготовлении автоматических космических аппаратов (КА) различного назначения для широкого круга заказчиков. Архитектура применяемых энергосистем при этом определяется конфигурацией, назначением, условиями функционирования КА и прочими требованиями и может отличаться как по приборному составу, так и по применяемым номиналам бортовых шин электропитания (27 В, 40 В, 50 В, 100 В).

Стабильные тенденции к росту мощности потребителей (полезная нагрузка, оборудование системы коррекции) вкупе с ужесточением требований по массе служебных систем приводит к необходимости увеличения номинального напряжения электропитания для снижения массовых характеристик бортовой кабельной сети. Одновременно с этим возрастают риски возникновения нештатных ситуаций вплоть до необратимых катастрофических отказов, а также последствия таких ситуаций.

Одной из наиболее приоритетных задач при проектировании автоматических КА является обеспечение их живучести с возможностью выполнения целевых задач без или с минимальными ограничениями даже в условиях произошедших аномальных ситуаций. Протекание сверхтоков, вызванное перегрузками, короткими замыканиями или иными отказами в бортовой аппаратуре или кабельной сети является одним из существенных факторов риска, приводящим к выходу из строя приборов, кабелей, или, в худшем случае, КА в целом. Исходя из этого, обеспечение защиты от сверхтоков является

важным направлением обеспечения эксплуатационной живучести при проектировании бортовых систем электропитания и систем распределения электроэнергии.

Существующие решения имеют ограничения по зоне применения и не позволяют в полной мере обеспечить токовую защиту и реализовать живучесть КА, что в свою очередь является критически важной технологией. Ввиду вышеизложенного, работа посвященная созданию устройств защиты цепей электропитания КА обеспечивающего защиту всей номенклатуры БА, является актуальной и полностью согласуется с запросами практики.

В процессе анализа имеющихся решений по данному направлению электрического проектирования выявлено:

- существующий объём российской нормативной документации, регламентирующей архитектуру построения систем энергоснабжения КА, а также требования к потребителям в части защиты цепей электропитания недостаточен;

- типовые масштабируемые технические решения, обеспечивающие построение систем гарантированной защиты цепей электропитания КА на сегодняшний день в отечественной космонавтике отсутствуют;

- в РФ в качестве защиты, как правило, применяются схемы на базе плавких вставок (ВП), в основном во входном каскаде потребителя. Данным схемам свойственны известные недостатки, такие как низкая скорость срабатывания, необходимость кратного превышения номинального тока для срабатывания, невозможность восстановления цепи после срабатывания, отсутствие телеметрического контроля;

Обзор доступных зарубежных профильных источников и электроники также подтверждает актуальность описанной проблемы. В настоящий момент в мировой практике для обеспечения защиты силовых цепей помимо плавких вставок применяются схемы на основе полупроводниковых структур (силовые ключи).

Наиболее перспективным вариантом реализации устройства защиты, лишенного недостатков схем на основе вставок плавких, являются электронные предохранители (ЭлП) многократного действия. В мировой практике имеется достаточный опыт их применения (для шин номиналом до 50 В), подтверждающий эффективность такого решения. При этом квалифицированные для космического применения устройства для защиты цепей номиналом свыше 80 В в открытых источниках информации не выявлены.

На этапе предпроектных работ был проведён анализ существующего опыта (отечественного и зарубежного) создания архитектур и устройств защиты силовых цепей электропитания как космического, так и наземного применения.

В статье приводятся результаты анализа архитектур СЭП, сформулированные функциональные требования к ЭлП требования к архитектурам перспективных СЭП.

© Гебгардт В. А., Клёнкин А. Ю., 2023

УДК 629.7.023.222

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКСИДА ЦИНКА В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. В. Купряшов\*, С. В. Телегин, А. В. Пронин, И. Я. Шестаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: KupryashovAndrey@yandex.ru

*Данная работа посвящена анализу опыта применения оксида цинка в составе композиций современных многофункциональных покрытий, применяемых для защиты электронной аппаратуры и блоков управления космических аппаратов.*

*Ключевые слова: защитное покрытие, оксид цинка, синергия, поглощение электромагнитного излучения, космический аппарат.*

## THE USE OF ZINC OXIDE AS A FILLER FOR PROTECTIVE COATINGS OF ELECTRONIC DEVICES FOR AEROSPACE TECHNOLOGY

A. V. Kupriashov\*, S. V. Telegin, A. V. Pronin, I. Y. Shestakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: KupryashovAndrey@yandex.ru

*This paper is devoted to the analysis of the experience of using zinc oxide as part of compositions of modern multifunctional coatings used to protect electronic equipment and control units of spacecraft.*

*Keywords: protective coating, zinc oxide, synergy, absorption of electromagnetic radiation, aircraft.*

Оксид цинка – это порошок белого цвета с высокой плотностью  $5,7 \text{ г/см}^3$ . Его особенностями являются: отсутствие эффекта плавления при высоких температурах, возможность перехода из твёрдого состояния в газообразное минуя жидкую фазу при температурах выше  $1800^\circ\text{C}$ , нерастворимость в водных растворах. В современной промышленности используется как активатор вулканизации синтетических каучуков, вулканизирующий агент хлоропреновых каучуков, катализатор синтеза метанола, также обладает фотокаталитической активностью, что полезно используется при создании самоочищающихся поверхностей и бактерицидных покрытий [1].

Оксид цинка применяется для производства компонентов полупроводниковых приборов, УФ-фильтров, датчиков, солнечных батарей, так как является оптически прозрачным широкозонным полупроводником [2]. В последнее время появились новые высокодисперсные формы в виде стержней, наночастиц и плёнок. Основной сферой применения указанных форм является использования в качестве наполнителя композиционных материалов системы металл/оксид, которые представляют большой интерес как функциональные защитные материалы [1]. Эксплуатационные свойства композитных покрытий улучшаются с ростом дисперсности и однородности распределения оксидной фазы наполнителя в полимерной матрице [2].

Совместное применение разных наполнителей способствует появлению эффекта синергизма, который заключается в повышении основных свойств и функциональных характеристик защитных покрытий по сравнению с покрытиями, наполненными только одним видом наполнителя. Результаты эксплуатационных испытаний показали, что практически все исследуемые параметры повышаются при использовании нескольких видов разных наполнителей [1].

Смесовой наполнитель с оксидом цинка активно применяется в радиационно-защитных авиационных покрытиях. Покрытие наполнитель, которого состоит из: оксида цинка, оксида хрома, оксида кальция [3] имеет высокую скорость поглощения электромагнитного излучения, высокое значение плотности слоев покрытия  $0,25 \div 0,3 \text{ г/см}^3$ , коэффициент электропроводности  $0,01 \div 0,014 \text{ Вт/м} \times \text{К}$ , высокий коэффициент отражения инфракрасного излучения. Покрытие устойчиво к высоким и низким температурам, выдерживает низкие температуры до  $-100^\circ\text{C}$  и высокие температуры  $500 \div 600^\circ\text{C}$ , а также обладает высоким коэффициентом адгезии.

Покрытие наполнитель, которого состоит из: оксида цинка, диоксида титана, оксида марганца, оксида железа и фталоцианина кобальта [4] устойчиво к высоким температурам 900÷1200 °С, поглощает волны радара обнаружения на частоте 8÷18 ГГц, ослабляет мощность воздействия электромагнитных волн на 8÷28 дБ, коэффициент отражения волн больше 0.8, а коэффициент поглощения солнечного излучения 0.9. Такое покрытие ударопрочное, а относительное удлинение составляет 420÷480%.

На рис. 1 показано изменение значения относительного удлинения при разрыве покрытия с увеличением содержания в смесовом наполнителе оксида цинка.

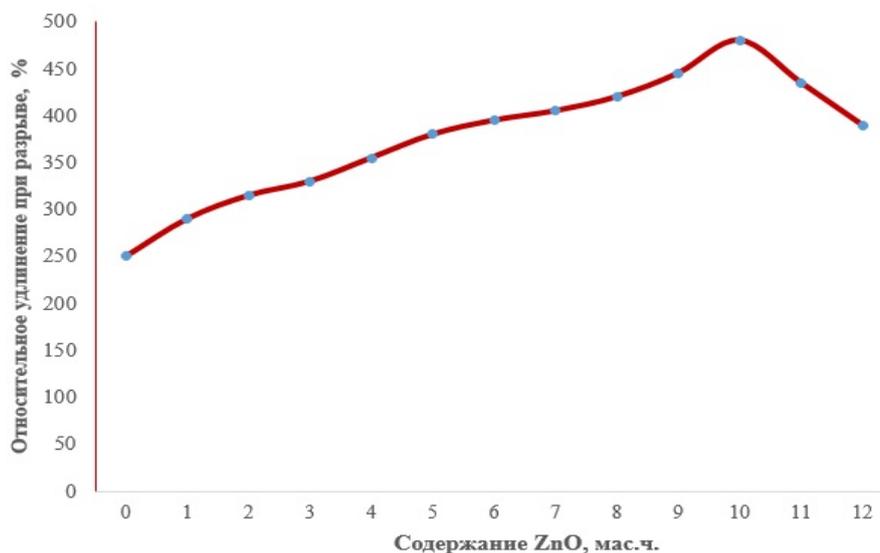


Рис. 1. Влияние содержания оксида цинка на относительное удлинение на разрыв противорадиолокационного покрытия

Получение новых смесовых наполнителей, содержащих оксид цинка является актуальной задачей. Проведенное аналитическое исследование позволяет подобрать варианты состава композиции для получения композиционного защитного покрытия ракетно-космической техники.

#### Библиографические ссылки

1. Купряшов А. В., Шестаков И. Я. Анализ смесовых наполнителей многофункциональных покрытий авиационной и ракетно-космической техники // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 12 (216). С. 535-541.
2. Синтез высокодисперсных форм оксида цинка: химическое осаждение и термолиз / Н. С. Николаева, В. В. Иванов, А. А. Шубин // Журнал Сибирского фед. ун-та. Сер. «Химия». 2010. № 3. С. 153-173.
3. Пат. 106609081 (А) КНР, МПК С09D 109/02, С09D 123/12, С09D 133/00, С09D 145/02. Противорадиолокационное покрытие самолетов и способ его изготовления / Ванг В. № CN201611260298; заявл. 30.12.2016; опубл. 03.05.2017.
4. Пат. 109370320 (А) КНР, МПК С09D 109/02. Способ изготовления противорадарного авиационного покрытия / Ванг Я., Кси Ю. № CN201811163759; заявл. 02.10.2018; опубл. 22.02.2019.

#### References

1. Kupriashov A.V., Shestakov I.Ya. Analysis of mixed filler multifunctional coatings of aviation, rocket and space technology. *Strengthening technologies and coatings*. 2022, Vol. 18, No. 12 (216), P. 535-541.
2. Nikolaeva N. S., Ivanov V. V., Shubin A. A. The Chemical Precipitation and Thermal Decomposition as the Way for Producing Ultrafine Zinc Oxide Forms. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2010, No. 3, P. 153-173.
3. Wang W. Aircraft anti-radar stealth coating and preparation method thereof. Patent China, no. 106609081 (A), appl. 30.12.2016, publ. 03.05.2017.
4. Wang Y., Xia Y. Preparation method of aviation anti-radar coating. Patent China, no. 109370320 (A), appl. 02.10.2018, publ. 22.02.2019.

УДК 621.039+629.78

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ

Д. А. Спирина, Е. В. Патраев, И. В. Трифанов\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*Показаны силовые методы и средства защиты от космической радиации.*

*Ключевые слова: радиация, электромагнитные и электрические поля, рекуператоры энергии.*

## METHODS AND MEANS OF PROTECTION AGAINST COSMIC RADIATION

D. A. Spirina, E. V. Patraev, I. V. Trifonov\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*Power methods and means of protection against cosmic radiation are shown.*

*Keywords: radiation, electromagnetic and electric fields, energy recuperators.*

Протоны и положительно заряженные ядра элементов космического излучения высокой энергии представляют главную опасность для космических полетов вне действия магнитного поля Земли [1,2].

Для защиты от радиации могут быть использованы силовые поля: магнитные, электромагнитные, электростатическое, а также комбинированные способы. Электростатическую защиту можно реализовать с меньшей массой по сравнению с чисто пассивной защитой. Предложены комбинированные методы защиты космических аппаратов от космической радиации на основе применения электростатических и магнитных полей, а также системы рекуперации энергии заряженных частиц путем применения защитных экранов, покрывающих космический аппарат снаружи [3].

Создаваемое в замкнутом защитном экране электростатическое или магнитное поле дает возможность обеспечить электростатическое или электромагнитное торможение заряженных частиц, прошедших из космоса в защищаемое пространство, с одновременной рекуперацией их энергии [4], и нейтрализацией электрического заряда.

Методы также могут быть использованы для получения электроэнергии на борту космического аппарата и управления энергетическими параметрами защитного электрического и электромагнитного полей, а также работой рекуператоров энергии заряженных частиц [3,4].

### Библиографические ссылки

1. Ваганов И.В., Федоров В.Б. Способы защиты космических аппаратов от действия космической радиации [Электронный ресурс]. URL: <http://dspsce.susu.ru/xmlui/bitstream/20.08.2023> (дата обращения 20.08.2023)
2. Ребеко, А.Г. Защита людей и космических аппаратов в космосе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. №5 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-lyudey-i-kosmicheskikh-apparatov-v-kosmose> (дата обращения: 23.08.2023).
3. Пат. 2714411 Российская Федерация Способ защиты от заряженных частиц космической радиации / Трифанов И.В., Мелкозеров М.Г., Трифанов В.И. № 2019121978; заявл. 09.07.2019, опубл. 14.02.2020, Бюл. № 5.

4. Пат. 2719503 Российская Федерация Рекуператор энергии ионов плазмы / Трифанов И.В. № 2019125761; заявл. 13.08.2019, опубл. 20.04.2020, Бюл. № 11.

### References

1. Vaganov I.V., Fedorov V.B. *Sposoby zashchity kosmicheskikh apparatov ot deystviya kosmicheskoy radiatsii* [Methods of protecting spacecraft from the effects of cosmic radiation] (In Russ.). Available at: <http://dpsce.susu.ru/xmlui/bitszeam> (accessed 20.08.2023)

2. Rebeko, A.G. [Protection of people and spacecraft in space] *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2016, No. 5 (53) (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-lyudey-i-kosmicheskikh-apparatov-v-kosmose>. (accessed 23.08.2023)

3. Trifanov I.V., Melkozerov M.G., Trifanov V.I. *Sposob zashchity ot zaryazhennykh chastits kosmicheskoy radiatsii* [Method of protection from charged particles of cosmic radiation]. Patent RF, no. 2714411, 2020.

4. Trifanov I.V. *Rekuperator energii ionov plazmy* [Plasma ion Energy Recuperator]. Patent RF, no. 2719503, 2020.

© Спирина Д. А., Патраев Е. В., Трифанов И. В., 2023

УДК 629.7.05

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ МОДЕЛЬНЫХ РАКЕТ НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМ ARDUINO И RACEBOARD

А. Ю. Тимошева\*, Н. А. Жердев, Д. А. Ковалев, М. С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: timosheva03@mail.ru

*Важнейшим этапом проектирования модельных ракет является разработка бортового комплекса, основными функциями которого является прием и передача телеметрии, отслеживание высоты и скорости полета, а также решение дополнительных задач. В данной статье описан опыт работы участников студенческого конструкторского бюро «СТАРТ» с аппаратной платформой Arduino, а также с готовым полетным контроллером RaCEboard.*

*Ключевые слова: модельная ракета, бортовой комплекс, Arduino, RaCEboard.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MODEL ROCKETS ONBOARD ELECTRONICS BASED ON ARDUINO AND RACEBOARD PLATFORMS

A. Yu. Timosheva\*, N. A. Zherdev, D. A. Kovalev, M. S. Rudenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: timosheva03@mail.ru

*The most important stage in the design of model rockets is the development of an onboard complex, the main functions of which are receiving and transmitting telemetry, tracking altitude and flight speed, as well as solving additional tasks. This paper describes the experience of the participants of the student design bureau "START" with the Arduino hardware platform, as well as with a ready-made RaCEboard flight controller.*

*Keywords: model rocket, onboard module, Arduino, RaCEboard.*

Одним из главных требований современных чемпионатов по запуску модельных ракет является проектирование бортовой электроники для получения данных о высоте полета, угловых скоростях и ускорениях, а также определения координат старта и приземления ракеты. За время участия в различных соревнованиях команда студенческого конструкторского бюро «СТАРТ» получила опыт работы с готовыми модулями датчиков на основе широко известной платформы Arduino, а также с контроллером RaCEboard версии 2023 года от студии высокотехнологичной разработки INNOPOL. Особенностью и преимуществом RaCEboard является компактность, размеры блока составляют 49\*49\*50 мм. Он также прост в сборке, его конструкция состоит из платы питания, датчиков, телеметрии и платы микроконтроллера, которые устанавливаются друг на друга, напоминая по структуре «бутерброд» [1]. Конструктивные части RaCEboard представлены на рис. 1. Однако данный контроллер представляет собой готовое изделие с универсальным набором датчиков. Проектируя бортовую электронику на базе Arduino, можно легко заменить некоторые датчики или добавить новые, что придает большую свободу и повышает функционал изделия.

В первую очередь стоит отметить, что бортовые комплексы Arduino и RaCEboard построены на разных микроконтроллерах, ATmega328 [2] и ESP32-S3 [3] соответственно. Большую роль для разработчика бортовой электроники играет количество пинов и аппаратных интерфейсов, поскольку требуется подключать большое количество датчиков. В целом, ESP32-S3 превосходит по характеристикам микроконтроллер ATmega328, однако последний имеет более широкий диапазон рабочего на-

пряжения. Также бортовая электроника на базе Arduino оказалась удобнее для отладки программного кода.

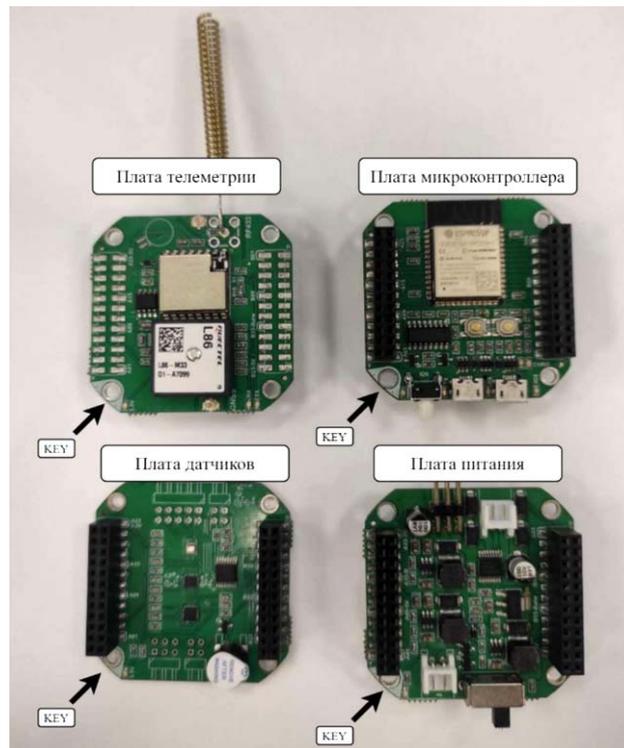


Рис. 1. Конструктивные части полетного контроллера RaCEboard

Таблица 1

#### Сравнение характеристик микроконтроллеров

Показатель	ATmega328	ESP32-S3
Удельная производительность ядра	1 MIPS/MHz	2,5 MIPS/MHz
Максимальная частота работы ядра	4 MHz @ 1.8 – 5.5V 10 MHz @ 2.7 – 5.5V 20 MHz @ 4.5 – 5.5V	240 MHz
Объем SRAM	2 Kb	512 Kb
Объем FLASH	32 Kb	8Mb
Объем EEPROM/ROM	1024 Kb (EEPROM)	384 Kb (ROM)
Рабочее напряжение	1,8-5,5V	2,2-3,6V
Кол-во пинов	32	57
Кол-во GPIO	22	45
Таймеры общего назначения	1 × 16 bit (PWM) 2 × 8 bit (PWM)	4 × 54 bit
Интерфейсы	1 SPI, 1 I2C, 1 UART	4 SPI, 2 I2C, 3 UART

Наполнение полетных контроллеров на основе Arduino и RaCEboard состоит из барометра, акселерометра, гироскопа, модуля SD-карты, датчика GNSS, а также радиомодуля. При необходимости проектирования активной системы спасения ракеты можно использовать сервопривод. Для определения высоты полета наиболее оптимальным вариантом является датчик BMP280. Он способен измерять атмосферное давление в диапазоне 300hPa...1100hPa, а также температуру в диапазоне -40...+85. Высота рассчитывается через готовую библиотеку. Акселерометр и гироскоп объединяются в один трехосевой датчик положения в пространстве. В составе бортовой электроники Arduino использовался модуль MPU-6050. Главной задачей является определение ускорения по оси Z, с помощью которого проверяется стартовое условие, а также определение угловых скоростей по трем осям для анимации углового положения ракеты. В полетном контроллере RaCEboard данные функции вы-

полнялись датчиком LSM6DSL. Для получения данных о дальности полета и скорости относительно поверхности земли необходимо считывать координаты с GPS датчика. Проводилось тестирование модулей GY-NEO-6M и L86-M33. Время холодного старта датчиков согласно документации составляет 27 и 35 секунд соответственно. В результате пробных проверок, время холодного старта обоих модулей превышало 5 минут, несмотря на то, что инициализация GNSS происходила на открытом пространстве. Контроллер RaCEboard принимает телеметрию посредством Ra01S с частотой передачи в 433 МГц. В рамках задачи, поставленной организаторами чемпионата, необходимо было передать короткое сообщение на наземную приемную станцию по достижении ракетой апогея. Для бортового комплекса на базе Arduino предполагалось использование радиомодуля nRF2401+ способного передавать сигнал на расстояние 1100 метров, однако датчик имеет довольно крупные размеры, что затрудняет компоновку элементов в корпусе бортового комплекса.

Для дальнейших проектов планируется найти оптимальную плату микроконтроллера с достаточным количеством интерфейсов для подключения датчиков, а также микро-USB разъемом для прошивки микроконтроллера или разработать данную платформу самостоятельно. Необходимо также продумать дополнительные варианты резервирования датчиков на случай выхода основных компонентов из строя.

### Библиографические ссылки

1. RaCEboard – электроника для твоего проекта [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZZPIS0XDrSw5yXClGmE41s2sWoMC18AL/view> (дата обращения: 10.09.2023).
2. Atmel ATmega328/P [DATASHEET] [Электронный ресурс]. URL: [https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf) (дата обращения: 08.09.2023).
3. ESP32S3WROOM1 Datasheet [Электронный ресурс]. URL: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2207151200\\_Espressif-Systems-ESP32-S3-WROOM-1-N16R8\\_C2913202.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2207151200_Espressif-Systems-ESP32-S3-WROOM-1-N16R8_C2913202.pdf) (дата обращения: 11.09.2023).

### References

1. RaCEboard-electronics for your project Available at: <https://drive.google.com/file/d/1ZZPIS0XDrSw5yXClGmE41s2sWoMC18AL/view> (accessed: 10.09.2023).
2. Atmel ATmega328 / P [DATASHEET] Available at: [https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf) (accessed: 08.09.2023).
3. ESP32S3WROOM1 Datasheet Available at: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2207151200\\_Espressif-Systems-ESP32-S3-WROOM-1-N16R8\\_C2913202.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2207151200_Espressif-Systems-ESP32-S3-WROOM-1-N16R8_C2913202.pdf) (accessed: 11.09.2023).

Тимошева А. Ю., Жердев Н. А., Ковалев Д. А., Руденко М. С., 2023

УДК 621.039+629.78

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ

В. И. Трифанов, Д. А. Спирина, И. В. Трифанов\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*Показаны принципы построения магнитной защиты от космической радиации и метод рекуперации энергии заряженных частиц.*

*Ключевые слова: космическая радиация, способ защиты от радиации, магнитное поле, рекуператор энергии.*

## FEATURES OF CONSTRUCTION OF MAGNETIC PROTECTION AGAINST COSMIC RADIATION

V. I. Trifanov, D. A. Spirina, I. V. Trifanov\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*The principles of construction of magnetic protection against cosmic radiation and the method of energy recovery of charged particles are shown.*

*Keywords: cosmic radiation, radiation protection method, magnetic field, energy recuperator.*

Пилотируемая космонавтика в далеком космосе требует разработки надежной защиты от космической радиации заряженных частиц со стороны солнца и галактических лучей [1].

Известен способ защиты от заряженных частиц космической радиации путем, создания магнитного поля локализованного в пространстве между двумя вложенными друг в друга замкнутых, геометрически непрерывных непересекающихся поверхностей применения магнитного поля [2].

Эффект защиты достигается за счет того, что на противостоящих поверхностях электрические токи противоположны по направлению. В связи с этим магнитное поле локализуется внутри устройства между поверхностями и ослабляется снаружи. При этом магнитные силовые линии замыкаются сами на себя. Для того, чтобы обеспечить сплошную замкнутую защиту, желательно тороидальная форма поверхности [2].

Защищаемое пространство космического аппарата ограничено внутренней поверхностью, а внешняя поверхность изолирует космический аппарат и защитное пространство от межпланетной плазмы [2]. При рациональном соотношении силы тока на противостоящих поверхностях можно добиться практически полной минимизации магнитного поля внутри и вне космического аппарата. Для снижения веса конструкции и уменьшения энергозатрат при создании магнитного, защитного поля необходимо применение сверхпроводников. Заряженная частица, попадает в пространство, где локализовано магнитное поле, под действием силы Лоренца начинает двигаться по искривленной отклоняющейся траектории, и может быть нейтрализована при помощи рекуператоров энергии заряженных частиц, установленных у полюсов магнитного поля [3], на поверхности космического аппарата [4] или между двумя вложенными друг в друга замкнутыми защитными поверхностями.

Рекуперация энергии заряженных частиц позволяет нейтрализовать захваченные потоки заряженных частиц, из межэлектродного пространства, стабилизировать магнитное поле, за счет уменьшения его ослабления сконцентрированными заряженными частицами, а также получить электростатиче-

ское электричество, которое можно преобразовать в электрический ток. Рекуператоры энергии заряженных частиц, установленные на поверхности космического аппарата, способны защитить от остаточного магнитного поля и прошедших через него заряженных частиц от космической радиации космонавтов и аппаратуру. Применение рекуператоров энергии заряженных частиц позволяет повысить эффективность и надежность применения радиационной защиты при помощи магнитного поля [4].

### Библиографические ссылки

1. Ребеко, А.Г. Защита людей и космических аппаратов в космосе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. №5 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-lyudey-i-kosmicheskikh-apparatov-v-kosmose> (дата обращения: 23.08.2023).
2. Пат. 2406661 Российская Федерация Способ защиты от заряженных частиц космической радиации / Ребеко А.Г. № 2008130936/11, заявл. 28.07.2008, опубл. 20.12.2010 Бюл. № 35.
3. Пат. 2719503 Российская Федерация Рекуператор энергии ионов плазмы / Трифанов И.В. № 2019125761; заявл. 13.08.2019, опубл. 20.04.2020, Бюл. № 11.
4. Пат. 2714411 Российская Федерация Способ защиты от заряженных частиц космической радиации / Трифанов И.В., Мелкозеров М.Г., Трифанов В.И. № 2019121978; заявл. 09.07.2019, опубл. 14.02.2020, Бюл. № 5.

### References

1. Rebeko, A.G. [Protection of people and spacecraft in space] *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2016, No. 5 (53) (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-lyudey-i-kosmicheskikh-apparatov-v-kosmose>. (accessed 23.08.2023).
2. Rebeko A.G. *Sposob zashchity ot zaryazhennykh chastits kosmicheskoy radiatsii* [Method of protection against charged particles of cosmic radiation]. Patent RF, no. 2406661, 2010.
3. Trifanov I.V. *Rekuperator energii ionov plazmy* [Plasma ion Energy Recuperator]. Patent RF, no. 2719503, 2020.
4. Trifanov I.V., Melkozerov M.G., Trifanov V.I. *Sposob zashchity ot zaryazhennykh chastits kosmicheskoy radiatsii* [Method of protection from charged particles of cosmic radiation]. Patent RF, no. 2714411, 2020.

© Трифанов В. И., Спирина Д. А., Трифанов И. В., 2023



**Секция**

**«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА  
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 621.382

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

С. М. Голованов<sup>1,2</sup>, В. И. Орлов<sup>1,2</sup>, В. В. Федосов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Испытательный технический центр – НПО ПМ»

Российская Федерация, 662970, г. Железногорск, ул. Молодежная, 20

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

*В докладе изложен подход к практическому использованию методов кластерного анализа при проведении испытаний электронной компонентной базы космического применения в испытательных технических центрах, позволяющий повысить качество и надежность поставляемой продукции.*

*Ключевые слова: электронная компонентная база, космическое применение, испытательный технический центр, методы кластерного анализа.*

## THE USE OF CLUSTER ANALYSIS METHODS IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMING ELECTRONIC COMPONENTS FOR SPACE APPLICATION

S. M. Golovanov<sup>1,2</sup>, V. I. Orlov<sup>1,2</sup>, V. V. Fedosov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> JSC «Testing Technical Center – NPO PM»

20, Molodezhnaya str., Zheleznogorsk, 662970, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

*The report describes an approach to the practical use of cluster analysis methods for testing the electronic components for space applications in testing technical centers, which allows improve the quality and reliability of the supplied products.*

*Keywords: electronic components, space application, testing technical center, cluster analysis methods.*

### Введение

Современный космический аппарат – это сложное электротехническое устройство, содержащее порядка 100-200 тысяч первичных электронных компонентов. С учетом того, что для бортовой аппаратуры космического аппарата в процессе его длительной эксплуатации (до 10-15 лет и более) проведение оперативного ремонта невозможно, к электронной компонентной базе (ЭКБ) космического применения предъявляются исключительно высокие требования по надежности [1-2]. В современных условиях в РФ комплектация космических аппаратов высоконадежными электронными компонентами возможно только через специализированные испытательные технические центры (ИТЦ), которые выступают в качестве связующего звена между заводами-изготовителями электронных компонентов и их потребителями в космической отрасли [3-4]. Учитывая отсутствие в нашей стране специализированного производства ЭКБ категории качества «Space», такой подход для отечественной космонавтики является единственно возможным. ИТЦ осуществляют формирование ЭКБ космического применения посредством проведения дополнительных испытаний (ДИ) электронных компонентов максимально доступного качества, позволяющих осуществить отбраковку элементов, содержащих скрытые дефекты, которые могут проявить себя при длительном функционировании в космическом пространстве [5-6].

В связи с этим, повышение эффективности ДИ имеет наиважнейшее значение для создания надежной отечественной космической техники. Как показывают исследования [7-9], повышение эффективности ДИ можно достичь посредством применения современных методов обработки информации, в частности, методов кластерного анализа.

### **Применение методов кластерного анализа в процессе ДИ**

Кластерный анализ или автоматическая группировка (АГ) данных – метод, выделяющий однородные подмножества таким образом, чтобы в многомерном пространстве характеристик входящие в их состав объекты имели значительное сходство, а сами подмножества обладали между собой существенными различиями. Ниже приведены задачи, решаемые в процессе ДИ с применением методов кластерного анализа.

#### **1. Автоматическая группировка электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям.**

Как показывает практика, алгоритм АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям является необходимым инструментом при формировании ЭКБ космического применения.

Для решения этой задачи разработан новый метод поиска условно оптимального варианта АГ, обеспечивающего заданную эффективность кластеризации, посредством введения специальных характеристик: вектора показателей эффективности разделения на группы и области качественного деления. Для определения границ области качественного деления используется метод обучения с применением размеченных обучающих выборок. Как показали исследования, разработанные алгоритмы позволяют осуществлять АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям со средней эффективностью (по индексу Рэнда) – 0,884.

#### **2. Формирование ТВ для проведения выборочных разрушающих испытаний**

В соответствии с действующей методикой, формирование ТВ для проведения выборочных разрушающих испытаний осуществляется случайным образом. При наличии информации о характеристиках (ТП) элементов возможно формирование ТВ, используя более достоверные стратегии. Например, в качестве элементов ТВ выбирать элементы с максимальным или минимальным разбросом характеристик, а также комбинацию этих методов. Возможны и другие стратегии формирования ТВ. Выбор конкретного варианта формирования ТВ определяется особенностями испытываемых типов ЭКБ, а также состава разрушающих испытаний, применяемого для данного типа ЭКБ.

#### **3. Дополнительные алгоритмы выявления потенциально ненадежных элементов.**

При проведении ДИ под потенциально ненадежными элементами (ПН-элементами) понимаются электронные компоненты, обладающие скрытыми дефектами, которые могут привести к отказу в течение длительной эксплуатации в условиях космического пространства. В технологическом процессе ДИ реализован способ определения ПН-элементов, как элементов, характеристики которых существенно отличаются от средних их значений по партии. По существующей технологии определение ПН-элементов осуществляется по каждой характеристике (тестовому параметру) элемента, в отдельности.

Предлагается дополнить такой подход алгоритмами, определяющими потенциально ненадежные элементы на базе анализа суммарного (кумулятивного) эффекта от отклонений характеристик (ТП) элементов.

Как показывают исследования, применение алгоритмов определения ПН-элементов на основе анализа обобщенных характеристик элементов в дополнение к существующему методу определения ПН-элементов по каждой характеристике (ТП), в отдельности, позволяет повысить среднюю суммарную эффективность выявления ПН-элементов с 82,0% до 90,6%.

#### **4. Применение методов кластерного анализа при формировании партий ЭКБ космического применения по технологии «специальных партий»**

В настоящее время наиболее перспективным считается формирование партий ЭКБ космического применения по технологии «специальных партий». Такая технология означает совместную работу ИТЦ и завода-изготовителя, каждый из которых осуществляет свою согласованную долю мероприятий по формированию ЭКБ космического применения.

Использование методов кластерного анализа при формировании партий ЭКБ космического применения позволит на заводе-изготовителе отобрать элементы, имеющие минимально возможный раз-

брос их характеристик, что, несомненно, скажется на общем качестве сформированной партии ЭКБ космического применения.

### Выводы

Как показали исследования, применение современных методов обработки информации, в частности методов кластерного анализа, позволяет повысить эффективность технологии формирования ЭКБ космического применения. Особенно ценным инструментом являются алгоритмы АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям. Это очень важно в настоящее время, в условиях сложных логистических схем поставок ЭКБ. Без сомнения, разработанные методы могут найти свое применение в других областях науки и техники.

### Библиографические ссылки

1. Данилин Н.С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских космических телекоммуникаций. Учебно-методическое пособие. – М.: РИО РТА, 2000. – 76с.
2. Орлов В.И., Федосов В.В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов//Решетневские чтения. 2013. Т.1, №17. С.238-241.
3. М. Горлов, Л. Ануфриев, А. Строгонов Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС. Chip News. №5. 2001 г. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL [http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01\\_05/stat-5.htm](http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01_05/stat-5.htm), дата обращения 30.04.2019.
4. Федосов В. В, Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50-55.
5. Федосов В.В. Комплексный подход к электронной компонентной базе как метод обеспечения длительной работоспособности космических аппаратов // Вестник СибГАУ. – 2014. Специальный выпуск. № 5. – С. 155-160.
6. Программа дополнительных испытаний электрорадиоизделий в испытательных технических центрах для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА по заказам Генерального заказчика // Железногорск, 2008.
7. Голованов, С. М. Об определении групп однородных элементов методами интеллектуальной обработки данных при высокотехнологическом производстве / С. М. Голованов, Л. А. Казаковцев, Г. Ш. Шкаберина // Индустрия 5.0, цифровая экономика и интеллектуальные экосистемы (ЭКО-ПРОМ-2021) : Сборник трудов IV Всероссийской (Национальной) научно-практической конференции и XIX сетевой конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–20 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 83-85. – DOI 10.18720/IEP/2021.3/19. – EDN FLSYNT.
8. С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов. Использование понятий однородности при проведении дополнительных испытаний электронной компонентной базы космического применения. Космические аппараты и технологии. Том 4. №4(34) 2020. С. 209-218. [http://journal-niss.ru/archive\\_view.php?num=235](http://journal-niss.ru/archive_view.php?num=235).
9. С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов. Определение однородности партии элементов как способ повышения качества тестирования электронной компонентной базы космического применения. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 4 (263) 2021.с.52-68.

### References

1. Danilin N.S. Informatsionnye tekhnologii i sertifikatsiya elementnoy bazy novykh rossiyskikh kosmicheskikh telekommunikatsiy. Uchebno-metodicheskoe posobie [Information technology and certification of the element base of new Russian space telecommunications. Study guide.]. – М.: RIO RТА, 2000. – 76s.
2. Orlov V.I., Fedosov V.V. Kachestvo elektronnoy komponentnoy bazy – zalog dlitelnoy rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov [Quality of electronic components – space long term performance of space vehicles]. Reshetnev Readings. 2013.Vol.1, No.17. P.238-241 (in Russ.).
3. M. Gorlov, L. Anufriev, A. Strogonov Otbrakovochnye tekhnologicheskie ispytaniya kak sredstvo povysheniya nadezhnosti partiy IS [Screening technological tests as a means of increasing the reliability of

IC lots]. Chip News. No. 5. 2001 [Electronic resource] Access mode: URL [http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01\\_05/stat-5.htm](http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01_05/stat-5.htm), access date 30.04.2019.

4. Fedosov V.V., Patraev V.E. Povyshenie nadezhnosti radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov pri primeneniі elektroradioizdeliy, proshedshikh dopolnitelnye otrakovochnye ispytaniya v spetsializirovannykh ispytatelnykh tekhnicheskikh tseentrakh [Increasing the reliability of electronic equipments for spacecrafts by using electronic components that have passed additional testing in specialized testing technical centers]. Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2006. No. 10. P. 50-55.

5. Fedosov V.V. Kompleksnyy podkhod k elektronnoy komponentnoy baze kak metod obespecheniya dlitelnoy rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov [An integrated approach to an electronic components as a method for ensuring long-term performance of spacecraft]. Vestnik SibGAU. Special Issue. 2014. No 5. P. 155-160.

6. Programma dopolnitelnykh ispytaniy elektroradioizdeliy v ispytatelnykh tekhnicheskikh tseentrakh dlya obespecheniya komplektatsii bortovoy apparatury KA po zakazam Generalnogo zakazchika [Program of additional tests of electronic components in testing technical centers to complete of onboard equipment of the space vehicles according to the orders of the General customer ]// Zheleznogorsk, 2008 (in Russ.).

7. Golovanov, S. M. Ob opredelenii grupp odnorodnykh elementov metodami intellektualnoy obrabotki dannykh pri vysokotekhnologicheskoy proizvodstve / S. M. Golovanov, L. A. Kazakovtsev, G. Sh. Shkaberina [On the definition of groups of homogeneous elements by methods of intelligent data processing in high-tech production] // Industry 5.0, Digital Economy and Intellectual Ecosystems (ECOPROM-2021) : Proceedings of the IV All-Russian (National) Scientific and Practical Conference and the XIX Network Conference with International participation, St. Petersburg, November 18-20, 2021. – Saint Petersburg: POLYTECH PRESS, 2021. – pp. 83-85. – DOI 10.18720/IEP/2021.3/19. – EDN FLSYNT.

8. S.M. Golovanov, V.I. Orlov, V.V. Fedosov. Ispolzovanie ponyatiy odnorodnosti pri provedenii dopolnitelnykh ispytaniy elektronnoy komponentnoy bazy kosmicheskogo primeneniya [The use of the concepts of uniformity when conducting additional tests of the electronic component base of space applications]. Spacecraft and technologies. Volume 4. №4(34) 2020. С. 209-218. [http://journal-niss.ru/archive\\_view.php?num=235](http://journal-niss.ru/archive_view.php?num=235).

9. S.M. Golovanov, V.I. Orlov, V.V. Fedosov. Opredelenie odnorodnosti partii elementov kak sposob povysheniya kachestva testirovaniya elektronnoy komponentnoy bazy kosmicheskogo primeneniya [Determination of the uniformity of the batch of elements as a way to improve the quality of testing of the electronic component base of space applications]. Electronic techniques. Series 2. Semiconductor devices. Issue 4. (263) 2021. с.52-68.

© Голованов С. М., Орлов В. И., Федосов В. В., 2023

УДК 537.311

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ  
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СТРУКТУРАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ  
В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ\***

Н. М. Егоров<sup>1\*</sup>, А. А. Левицкий<sup>1</sup>, А. М. Ситников<sup>1</sup>

Сибирский Федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
\*E-mail: NEgorov@sfu-kras.ru

*Рассмотрены основы СВЧ метода исследования дрейфовой скорости носителей заряда в полупроводниковых структурах. Результаты исследований могут быть использованы при создании элементной базы СВЧ диапазона для ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: полупроводники, скорость носителей заряда, сильные электрические поля.*

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DRIFT VELOCITY OF CHARGE CARRIERS  
IN GALLIUM ARSENIDE STRUCTURES IN STRONG ELECTRIC FIELDS**

N. M. Egorov<sup>1\*</sup>, A. A. Levitskiy<sup>1</sup>, A. M. Sitnikov<sup>1</sup>

Siberian Federal University  
79, Svobodny prospekt, 660041 Krasnoyarsk, Russian Federation  
\*E-mail: NEgorov@sfu-kras.ru

*The article considers the microwave method for studying the drift velocity of charge carriers in semiconductor structures are considered. The results of the research can be used to create an element base of the microwave range for the rocket and space industry.*

*Keywords: semiconductors, drift velocity of charge carriers, strong electric fields.*

Первые экспериментальные работы, посвященные исследованию электропроводности полупроводников в сильных электрических полях, появились в конце 30-х годов 20 века. В работе [1] авторы считали, что изменение электропроводности обусловлено главным образом ростом концентрации электронов вследствие процессов генерации. В работах [2, 3] было установлено значительное снижение подвижности электронов в *n-Ge* в сильных полях, при которых еще отсутствует генерация электронов.

В первоначальный период исследований широкое распространение получили методы, в которых для разогрева носителей применялось СВЧ электрическое поле [4]. В настоящее время СВЧ методы исследования не утратили своей значимости, с их помощью выполняется множество теоретических и экспериментальных исследований.

В данной работе представлены основы интегральной методики измерения электропроводности полупроводников в сильных электрических полях. В ходе эксперимента образец, помещенный в волновод, в область сильного СВЧ поля с амплитудой  $E_1$  и частотой  $\omega$ , включается так же в цепь небольшого постоянного напряжения, создающего слабое электрическое поле  $E_0$ . В итоге к образцу оказывается приложено суммарное электрическое поле:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1 \cos \omega t, \quad (1)$$

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

причем  $E_0 \ll E_1$ . Экспериментально определяется изменение величины постоянного тока  $\langle I_0 \rangle$  в цепи постоянного напряжения с изменением амплитуды СВЧ поля в волноводе:

$$\langle I_0 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(E) d(\omega t). \quad (2)$$

Здесь обозначение  $\langle I_0 \rangle$  показывает, что величина тока усредняется за один период колебаний. Выражение (2) может быть представлено в виде

$$\langle I_0 \rangle = \frac{E_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_d(\omega t) d(\omega t), \quad (3)$$

где  $\sigma_d$  – дифференциальная проводимость материала в сильных электрических полях.

Учитывая, что ток в слабом электрическом поле  $I_0 = \sigma_0 E_0$ , получим:

$$\frac{\langle I \rangle}{\langle I_0 \rangle} = \frac{1}{2\pi \sigma_0} \int_0^{2\pi} \sigma_d(\omega t) d(\omega t), \quad (4)$$

где  $\sigma_0$  – проводимость материала в слабых полях.

Выражение (4) представляет собой интегральное уравнение, где  $\sigma_d$  является неизвестной функцией, а  $\langle I \rangle / \langle I_0 \rangle$  – экспериментально измеренная величина. Проводимость материала находится путем интегрирования экспериментальной кривой  $\langle I \rangle / \langle I_0 \rangle$ .

Полученная в результате расчетов зависимость дифференциальной проводимости  $\sigma_d$  от величины приложенного к образцу поля используется для расчета полескоростной характеристики (ПСХ) – зависимости дрейфовой скорости носителей заряда в полупроводнике от величины приложенного поля:

$$v(E) = \frac{2}{n_0 e} \int_0^E \sigma_d(E) d(E), \quad (5)$$

где  $n_0$  – концентрация носителей заряда в полупроводнике,  $e$  – заряд электрона.

В качестве источника СВЧ сигналов в эксперименте был использован импульсный генератор, оснащенный магнетроном МИ-89В, имеющий следующие характеристики: центральная частота – 9,375 ГГц; импульсная мощность – 55 кВт (обеспечивает напряженность электрического поля в волноводном тракте и на образце не менее 10 кВ/см); длительность генерируемых СВЧ импульсов –  $\tau_1 = 1$  мкс,  $\tau_2 = 2$  мкс.

Были проведены измерения нескольких экспериментальных образцов, изготовленных из эпитаксиальных структур арсенида галлия. Образцы имели близкое по величине значение сопротивления и следующие геометрические размеры: длина 4 мм, ширина 0,4 мм, толщина 0,4 мм. Образцы 1 и 2 имели толщину активного слоя  $d = 8$  мкм и концентрацию носителей  $n = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , в образцах 3 и 4 толщина активного слоя составляла  $d = 8$  мкм, а концентрация носителей  $n = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

По снятым экспериментальным кривым путем решения интегрального уравнения (4) численными методами были вычислены зависимости дрейфовой скорости носителей заряда  $v(E)$  (Рис. 1), относительной дифференциальной проводимости  $\sigma_d/\sigma_0$ , дифференциальной подвижности  $\mu_d(E)$ .

Анализ полученных зависимостей позволяет выделить следующие закономерности:

1. Величины пороговых полей экспериментальных образцов, изготовленных из одной структуры, имеют разброс и находятся в диапазоне  $E = 3,1\text{--}3,6$  кВ/см.

2. Графики зависимостей  $\sigma_d/\sigma_0 = f(E)$  имеют экстремумы в диапазоне полей  $E = 4,5\text{--}5$  кВ/см на уровне  $\sigma_d/\sigma_0 = -(0,3\text{--}0,5)$ .

Из полученных данных следует, что в ходе эксперимента происходит неконтролируемый процесс, приводящий к разбросу величины порогового поля у образцов, изготовленных из одной эпитаксиальной структуры. Таким процессом может быть захват электронов глубокими уровнями, наиболее сильно влияющий на перенос носителей в области полей близких к пороговому.

Повышенная концентрация глубоких уровней, может быть обусловлена дефектами структуры, возникающими в процессе роста эпитаксиальной пленки.

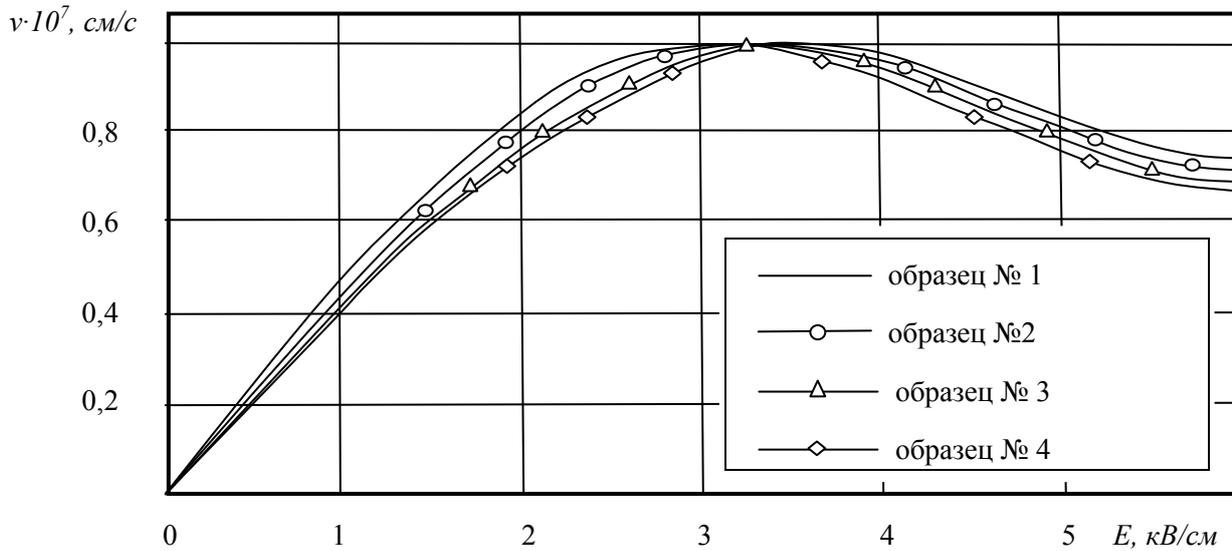


Рис. 1. Экспериментальные зависимости  $v(E)$  эпитаксиальных структур арсенида галлия

Таким образом, интегральная СВЧ методика измерения ПСХ, позволяет оценить качество и определить функциональные возможности эпитаксиальных структур, используемых для изготовления полупроводниковых приборов СВЧ диапазона для ракетно-космической отрасли.

#### Библиографические ссылки

1. Иоффе А.В., Иоффе А.Ф. *ЖЭТФ*, 1939, 9, 1428 с.
2. Ryder E.J., Shockley W. *Phys. Rev.*, 1951, 81, 139 p.
3. Ryder E.J., Shockley W. *Phys. Rev.*, 1953, 90, 766 p.
4. Morgan T.N. The mobility of electrons heated by microwave fields in *n*-type germanium. *J. Phys. Chem. Sol.*, 1959, v, 8, №1, P. 245–249.

#### References

1. Ioffe A.V., Ioffe A.F. *ZhE`TF*, 1939, 9, 1428 s.
2. Ryder E.J., Shockley W. *Phys. Rev.*, 1951, 81, 139 p.
3. Ryder E.J., Shockley W. *Phys. Rev.*, 1953, 90, 766 p.
4. Morgan T.N. The mobility of electrons heated by microwave fields in *n*-type germanium. *J. Phys. Chem. Sol.*, 1959, v, 8, №1, P. 245–249.

© Егоров Н. М., Левицкий А. А., Ситников А. М., 2023

УДК 621.396.6

## О СОГЛАСОВАНИИ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ И РАСЧЕТЕ ЕМКОСТИ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ\*

Д. И. Поляков \*, А. А. Левицкий

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10  
\*E-mail: polyakov.dima.i@yandex.ru

*Частотно-избирательные устройства на поверхностных акустических волнах широко применяются в областях электроники, где важно качество передачи сигнала, а габариты аппаратуры ограничены. Эффективность работы данных устройств во многом зависит от их согласованности с электрическим трактом. В данной работе проводится оценка подходов к расчету емкости входного (выходного) преобразователя фильтра, значение которой необходимо учитывать снижения отражения сигнала.*

*Ключевые слова:* фильтры на ПАВ, емкость, ВШП.

## ON THE MATCHING OF FILTERS ON SURFACE ACOUSTIC WAVES AND THE CALCULATION OF THE CAPACITANCE OF AN INTERDIGITAL TRANSDUCER

D. I. Polyakov \*, A. A. Levitsky

Siberian Federal University  
79, Svobodny prospekt, 660041 Krasnoyarsk, Russian Federation  
\*E-mail: polyakov.dima.i@yandex.ru

*Frequency-selective devices based on surface acoustic waves are widely used in electronics where the quality of signal transmission is important, and space is limited. The quality of the operation of these devices largely depends on the consistency with the components of the electrical circuit. In this paper, we evaluate approaches to calculating the capacitance of filter elements, the value of which must be taken into account in order to achieve optimal consistency.*

*Keywords:* SAW filters, capacitance, IDT.

Фильтрация радиочастотных сигналов является важным процессом в радиотехнике и электронике, поскольку позволяет провести селекцию сигнала определенной частоты, отделяя его от помех, тем самым улучшая качество передачи и приема данных. В современных системах радиосвязи, радиолокации и навигации применяется множество типов устройств фильтрации сигнала, каждый из которых имеет свои особенности, среди которых особого внимания заслуживают фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Фильтры на ПАВ имеют ряд преимуществ перед другими типами фильтров, в том числе широкий диапазон рабочих частот (от 5 МГц до 2 ГГц), низкий коэффициент прямоугольности (1,45) и высокий коэффициент затухания сигнала за полосой пропускания (60 дБ). Кроме того, фильтры на ПАВ имеют низкий габаритный индекс (2,5), что позволяет использовать их в аппаратуре с ограниченным объемом. Структура трансверсального фильтра на ПАВ представлена на рис. 1.

Важным аспектом применения фильтров на ПАВ является корректное согласование с внешними нагрузками. Поэтому определение входного и выходного импеданса такого фильтра, включая активную и реактивную составляющие является актуальной задачей.

---

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Существует ряд методов расчета емкости встречно-штыревого преобразователя (ВШП), каждый из которых предполагает расчет емкости между двумя электродами на единицу длины. В данной работе рассмотрим два подхода к расчету емкости ВШП.

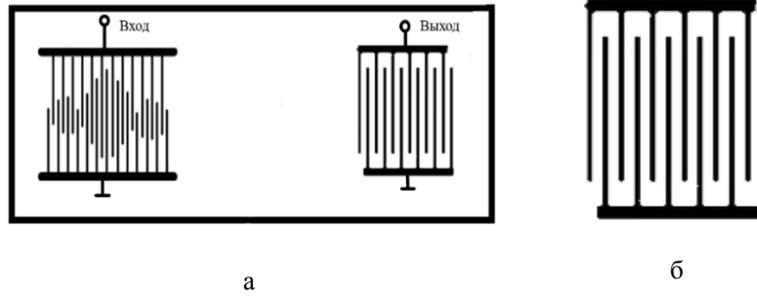


Рис. 1. Структура фильтра на ПАВ  
 а – фильтр на ПАВ; б – встречно-штыревой преобразователь

При расчете будем считать, что электроды имеют одинаковую ширину  $d = 7,3$  мкм, расстояние между соседними электродами равно их ширине, длина перекрытия электродов  $W = 2,18$  мм, ВШП содержит десяти электродов равной длины, подложка толщиной  $h = 1$  мм выполнена из  $\text{LiNbO}_3$  с диэлектрической проницаемостью 43,6.

В первом подходе используется метод частичных емкостей, при котором емкость структуры  $C$  рассчитывается как сумма частичных емкостей [1]

$$C = C_1 + C_2, \tag{1}$$

где  $C_1$  учитывает вклад полей рассеяния в свободном пространстве, а  $C_2$  – в подложке. Емкость  $C_1$  рассчитывается по формуле  $C_1 = \varepsilon_0 F(k_1) \cdot W$ , где  $F(k) = K(\sqrt{1-k^2})/K(k)$ ,  $K(k)$  – полный эллиптический интеграл первого рода,  $k$  – модуль эллиптического интеграла, принимаемый при расчете  $C_1$  равным  $k_1 = dl/l$ ,  $l = 3d$  – расстояние между внешними кромками электродов. Частичная емкость  $C_2$  определяется с помощью соотношений

$$C_2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_2 - 1) F(k_2) \cdot W, \quad k_2 = \text{th}\left(\frac{\pi d}{4h}\right) / \text{th}\left(\frac{\pi l}{4h}\right).$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость свободного пространства над подложкой,  $\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость подложки.

Второй подход [2] основан на использовании следующего соотношения для расчета погонной емкости  $C_S$ :

$$C_S = 2 \varepsilon_1 \cdot \frac{K(k_1)}{K(\sqrt{1-k_1^2})} + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot \frac{K(k_2)}{K(\sqrt{1-k_2^2})}, \tag{2}$$

где  $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость пространства над подложкой, модули эллиптических интегралов рассчитываются по следующим формулам

$$k_1 = \sqrt{\frac{ab}{(a+d)(b+d)}}, \quad k_2 = \sqrt{\frac{(t_1-t_2)(t_3-t_2)}{(t_1+t_2)(t_2+t_3)}}, \quad t_i = \frac{\exp(\lambda_i) - 1}{\exp(\lambda_i) + 1}, \tag{3}$$

где  $a, b$  – значения ширины электродов,  $d$  – расстояние между электродами, параметры  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , определяются по следующим формулам:  $\lambda_1 = (2b+d)/2h$ ,  $\lambda_2 = \pi d/2h$ ,  $\lambda_3 = \pi(2a+d)/2h$ , где  $i$  – индекс параметра  $t$  принимающий значения от 1 до 3.

Для вычисления емкости ВШП применяется формула  $C = C_s \times (N - 1) \times W$ .

Расчеты показали, что емкость ВШП, согласно [1] равна 6,05 пФ, а согласно [2] – 5,27 пФ. Данные значения существенно отличаются друг от друга, что требует проведения дополнительных расчетов для проверки их корректности.

Для оценки корректности полученных результатов был проведен электростатический расчет структуры ВШП в программном пакете COMSOL Multiphysics (рис. 2), который показал емкость ВШП при приведенных выше параметрах, равную 4,65 пФ.

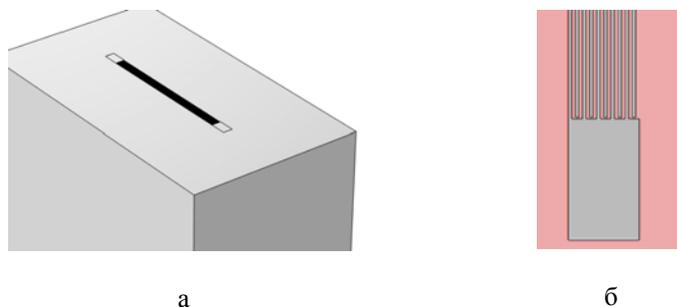


Рис. 2. Модель структуры в программном пакете COMSOL Multiphysics  
а – подложка с ВШП; б – фрагмент структуры ВШП

Полученная при помощи COMSOL Multiphysics величина емкости отличается от результатов, полученных с использованием аналитических моделей. Например, при использовании метода, описанного в [1], отклонение от результата численного моделирования составляет 30,1 %, а при использовании модели [2] – 13,3 %. Это указывает на то, что аналитические методы расчета, по-видимому, не учитывают значимых физических факторов, влияющих на емкость ВШП, и могут применяться только для примерной ее оценки.

#### Библиографические ссылки

1. Вендик О. Г., Зубко С. П., Никольский М. А. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика // Журнал технической физики, 1999, т. 69, вып. 4. С. 1-17.
2. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струтский М. Г. Расчет электрической емкости. Ленинград : ЭНЕРГОИЗДАТ, 1981. 285 с.

#### References

1. Vendik O. G., Zubko S. P., Nikol'skij M. A. *Modelirovanie i raschet emkosti planarnogo kondensatora, sodержashhego tonkij sloj segnetoe'lektrika* [Simulating and calculating the capacity of a planar capacitor containing a thin layer of ferroelectric] // Technical Physics, 1999, Vol. 69, No. 4. P. 1-17.
2. Iossel' Yu. Ya., Kochanov E'. S., Strutskij M.G. *Raschet e'lektricheskoy emkosti* [Calculation of electric capacitance]. Leningrad : E'NERGOIZDAT, 1981. 285 s.

© Поляков Д. И., Левицкий А. А., 2023

УДК 621.382

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ В СРЕДЕ MATLAB\*

В. О. Фадеев\*, П. С. Маринушкин

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28  
\*E-mail: viafad98@gmail.com

*В статье рассматриваются вопросы разработки программного приложения для расчёта топологии полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Особенностью программы является возможность непосредственной генерации топологического рисунка в формате DXF. Реализация такого приложения снимает проблему обмена данными между разнородными программными средствами.*

*Ключевые слова: ПАВ фильтры, MATLAB, графический интерфейс, расчёт топологии.*

## COMPUTER-AIDED DESIGN SAW FILTERS IN MATLAB

V. O. Fadeev\*, P. S. Marinushkin

Siberian Federal University  
28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation  
\*E-mail: viafad98@gmail.com

*This article discuss the development of a software application for calculating the topology of a SAW filters. Key element of the program is the generation of a topology drawing in DXF format. The implementation of such an application removes the problem of data exchange between diverse software.*

*Keywords: SAW filters, MATLAB, graphic user interface, topology calculation.*

Фильтры на ПАВ (рис. 1) широко применяются в радиоэлектронике, телевидении и связи. Основными преимуществами таких фильтров являются их механическая прочность и надёжность, а также малые размеры и масса в сравнении с аналогичными устройствами, работающими в диапазонах от ультракоротких волн до сверхвысоких частот (от 1 МГц до 2 ГГц). Главным плюсом ПАВ является их малая скорость распространения по поверхности пьезоэлектрической подложки – от 1500 м/с до 5000 м/с [1].

Целью данной работы является разработка приложения для расчёта, построения и получения топологии полосовых фильтров в формате DXF по заданным параметрам, к числу которых относятся: центральная частота полосы пропускания, ширина полосы пропускания, требуемое подавление в полосе заграждения. Кроме того, частотно-избирательные свойства фильтра определяются свойствами используемого пьезоматериала, видом встречно-штыревых преобразователей (ВШП) и конфигурацией микрополоскового ответвителя.

Расчёт фильтра без учёта влияния вторичных эффектов происходит в следующем порядке:

1. Исходя из заданных требований выбирается материал подложки, анализируются необходимые для дальнейших расчётов характеристики материала.
2. С учётом требований к частотным характеристикам определяется вид топологии ВШП, рассчитывается функция аподизации электродов исходя из выбранной оконной функции.
3. Рассчитывается топология преобразователей, а именно определяется количество пар электродов, рассчитывается ширина электродов и расстояние между ними, выбирается или рассчитывается максимальное значение апертуры преобразователей. Рассчитываются координаты краёв пар электродов относительно горизонтальной оси исходя из функции аподизации

---

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

4. Находятся минимально необходимые габаритные размеры подложки ПАВ-устройства с учётом размеров ВШП.

5. Рассчитываются частотные характеристики ПАВ-устройства, соответствующие спроектированной топологии преобразователей [2].

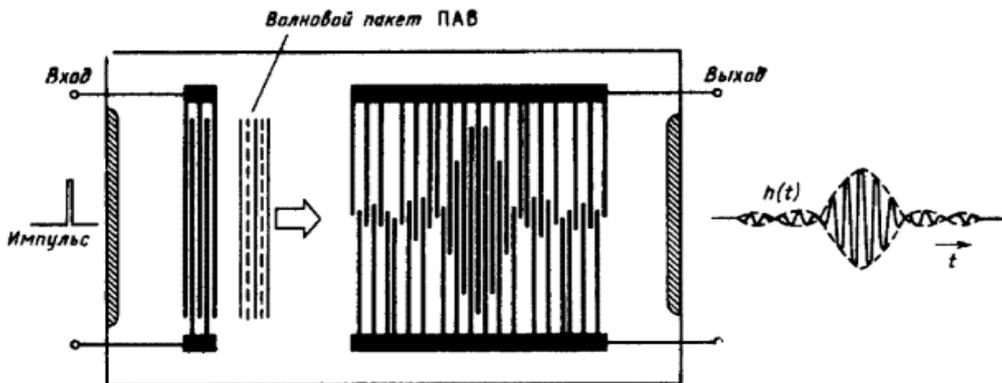


Рис. 1. Фильтр на ПАВ [3]

Формат DXF для вывода топологии используется из-за своей широкой распространённости и ASCII кодировки, что позволяет открыть его любым текстовым редактором. Данное свойство позволяет формировать чертёж, записывая построчно команды в текстовый файл. DXF (Drawing eXchange Format) – это формат, состоящий из многочисленных секций, содержащий определённую информацию, перед каждым элементом информации присутствует тег обозначающий тип этой информации. Данный формат имеет открытый исходный код, подробную информацию о структуре файла можно найти в официальной документации, представленной на сайте Autodesk [4].

Создание приложения потребовало написания библиотек соответствующих графических функций. Базовой функцией является функция построения прямой линии по заданным координатам. С её помощью реализованы функции построения ВШП, микрополоскового ответвителя (МПО) и другие функции связанные с выводом геометрии на чертёж.

Разработанный интерфейс приложения представлен на рис. 2.

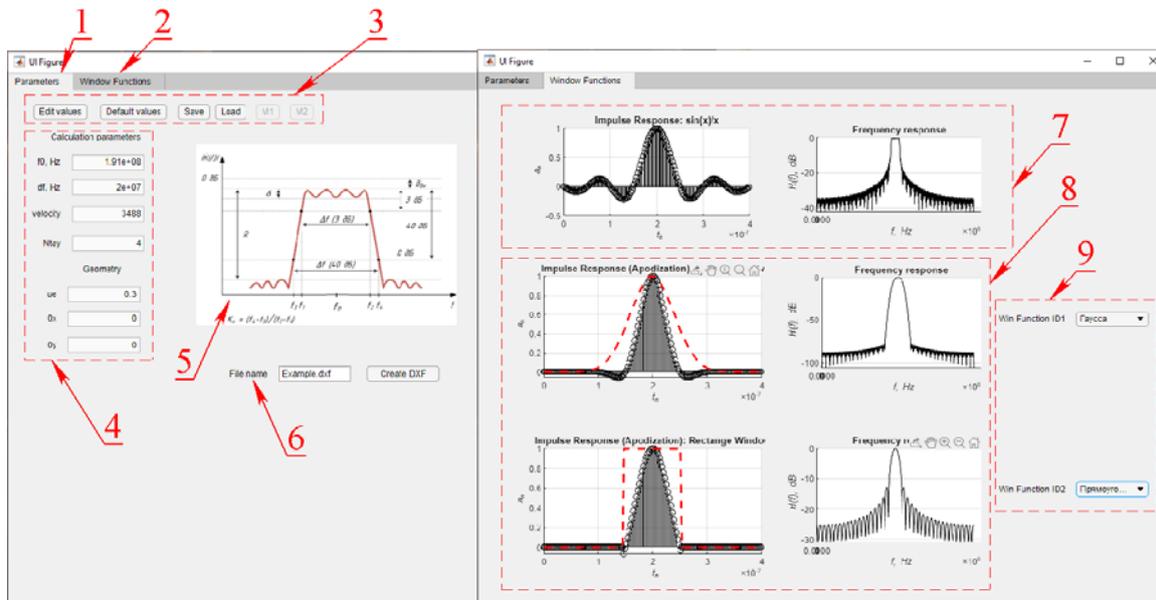


Рис. 2. Интерфейс приложения:

- 1 – вкладка для задания основных параметров;
- 2 – вкладка для выбора оконной функции;
- 3 – кнопки для сохранения, загрузки, редактирования переменных;
- 4 – область с переменными;
- 5 – поясняющее изображение;
- 6 – редактирование названия файла и кнопка генерации DXF файла;
- 7 – импульсная характеристика фильтра и АЧХ;
- 8 – Графики импульсных характеристик и АЧХ для оконных функций;
- 9 – список для выбора оконной функции.

На первой вкладке осуществляется задание параметров фильтра и геометрии. На второй вкладке отображаются графики импульсных характеристик и АЧХ фильтра и оконных функций.

Результатом работ программы является DXF-файл с топологией МПО и двух ВШП, соответствующей выбранным оконным функциям. Дальнейшая работа в данном направлении предусматривает улучшение интерфейса и функционала программы.

#### Библиографические ссылки

1. Орлов В. С., Бондаренко В. С. *Фильтры на поверхностных акустических волнах*. М. : Радио и связь, 1984. 272 с.
2. Никонова Г. С. Основные принципы проектирования и температурной стабилизации ПАВ-устройств // Омский научный вестник. 2012. №3 (113). С. 327-330
3. Морган Д. *Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ.* М. : Радио и связь, 1990. 416 с.
4. *AutoCAD 2012 DXF Reference*. Autodesk, 2011. 253 с.

#### References

1. Orlov V. S., Bondarenko V.C. *Surface-Wave Filters*. M. : Radio and communication, 1984. 272 p.
2. Nikonova G. S. *Base desing principles and temperature stability of SAW-devices // Omsk's science Herald*. 2012. №3(113). P. 327-330
3. David P. Morgan *Surface-Wave Devices for Signal Processing*. M. : ELSEVIER, 1985. 416 p.
4. *AutoCAD 2012 DXF Reference*. Autodesk, 2011. 253 p.

© Фадеев В. О., Маринушкин П. С., 2023

УДК 621.382.3

## ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ\*

А. А. Шевелева\*, П. С. Маринушкин

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28  
\*E-mail: anshev7101@gmail.com

*Обозначена проблема отсутствия библиотек SPICE-моделей для отечественной элементной базы. Поставлена задача разработки собственного программного комплекса для экстракции параметров полупроводниковых приборов. Приведен пример экстракции параметров в приложении Matlab на основе данных SPICE-симулятора.*

*Ключевые слова: моделирование, экстракция параметров, SPICE-модель.*

## PARAMETER EXTRACTION FOR THE BIPOLAR TRANSISTOR COMPACT MODELS

A. A. Sheveleva\*, P. S. Marinushkin

Siberian Federal University  
28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation  
\*E-mail: anshev7101@gmail.com

*This work highlights the problem of the lack of PSPICE-models libraries for the domestic element base. The consequence is the task of developing our own software package for extraction of parameters of semiconductor devices. The example of parameter extraction in Matlab application based on SPICE-simulator data is given.*

*Keywords: modeling, parameter extraction, SPICE-model.*

Одним из обязательных этапов при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических систем является этап схемотехнического моделирования, выполняющийся с помощью специальных программ-симуляторов, главным элементом которых являются библиотеки математических моделей полупроводниковых компонентов (так называемых SPICE моделей). При всей результативности технологий схемотехнического моделирования эффективность их внедрения в производственную практику сдерживается отсутствием библиотек для отечественной элементной базы. Если зарубежные производители полупроводниковых приборов сопровождают свои изделия готовыми библиотеками моделей, то отечественные производители подобных библиотек, как правило, не предоставляют. Существующие программы идентификации параметров моделей расчетным путем по экспериментальным данным не позволяют в полной мере решить эту проблему и не удовлетворяют потребностям импортозамещения в ракетно-космической и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Примером является программный комплекс IC-CAP компании Agilent, который позволяет моделировать полупроводниковые устройства и обеспечивает мощные возможности подключения систем управления и контроля для анализа всех современных процессов производства полупроводников. Основная задача создания методик и программ определения параметров SPICE моделей радиоэлементов и разработки на их основе соответствующих библиотек представляет значительный научно-технический и практический интерес. Целью настоящей работы является разработка собственного автоматизированного комплекса для экстракции параметров биполярных транзисторов.

---

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Для схемотехнического моделирования в качестве SPICE-модели биполярного транзистора обычно применяют модель Гуммеля–Пуна [1]. Ее SPICE-параметры приведены в таблице 1. Полный перечень включает в себя более полусотни, в таблице приведена лишь часть основных экстрагируемых параметров.

Таблица 1

Параметры SPICE-модели Гуммеля-Пуна

Обозначение	Параметр
VAF/VAR	Напряжение Эрли в нормальном режиме/...в инверсном режиме
RBM/RC/RE	Минимальное сопротивление базы при больших токах/Объемное сопротивление коллектора/Объемное сопротивление эмиттера
CJC/CJE/CJS	Емкость при нулевом смещении коллекторного перехода/...эмиттерного перехода/...коллектор-подложка
AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума
BF/BR	Максимальный коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ/ ... в инверсном режиме в схеме с ОЭ
EG	Ширина запрещенной зоны
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода
IKF/IKR	Прямой предельный ток при высоком уровне инжекции/ Обратный предельный ток при высоком уровне инжекции
IRB/IS	Ток при среднем сопротивлении базы/Ток насыщения при 27°C
ISC/ISE/ISS	Ток насыщения утечки перехода база-эмиттер/...перехода база-коллектор/Ток насыщения p-n перехода подложки

На рисунке 1 представлена блок-схема, отражающая алгоритм проведения экстракции параметров биполярных транзисторов с помощью приложения, созданного в среде Matlab. Общий алгоритм включает в себя: измерение параметров реальных тестовых образцов; сбор данных результатов измерений; графический анализ и извлечение параметров; обработка результатов и формирование SPICE-модели; верификация модели в SPICE-симуляторе; повторная обработка и перерасчет для достижения максимального соответствия результатов моделирования результатам аналогичных характеристик, полученных экспериментально.

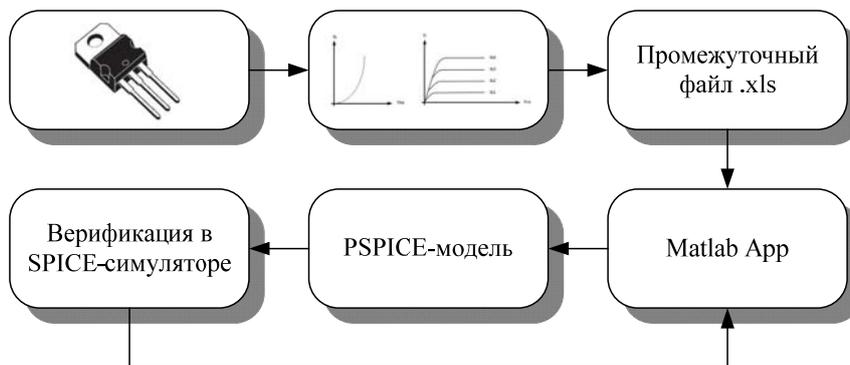


Рис. 3. Экстракция параметров

Для примера на рисунке 2 изображено окно приложения с вкладкой для расчета напряжения Эрли в нормальном режиме (forward Early voltage, VAF [3]). В левой половине находится поле для построения вольтамперной характеристики (ВАХ) транзистора, в правой – краткая инструкция по расчету параметра, блок кнопок и поле для вывода числового значения параметра. Импорт производится из промежуточного файла (таблицы Excel), содержащего числовые значения ВАХ.

SPICE-параметры несут определенный физический смысл или являются подстраиваемыми коэффициентами [2]. Экстракция параметров является оптимизационной задачей поиска и подбора таких значений параметров, которые сведут к минимуму разницу между результатами моделирования построенной модели полупроводникового прибора и результатами его характеристик, полученных в эксперименте с реальных образцов.

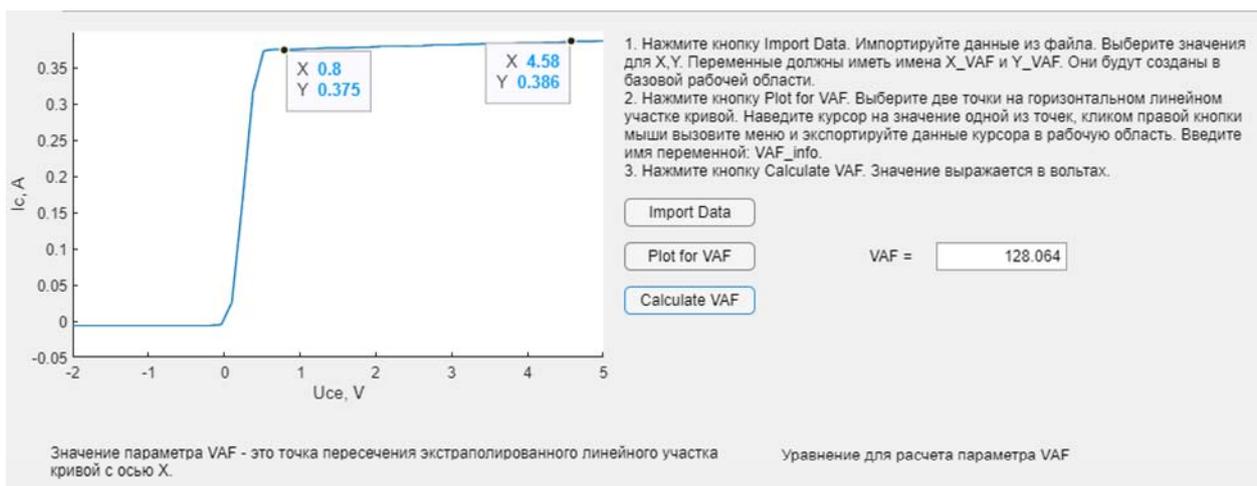


Рис. 4. Окно приложения в Matlab

Модель транзистора будет настолько точной, насколько точны параметры, которые ее описывают. Однако точность не всегда является самым важным критерием для модели устройства. Заставить модель вести себя как реальное устройство – главная задача. Поэтому эффективность создаваемой PSPICE-модели требует учета многих факторов. Необходимо проводить экстракцию группы приборов, что позволит построить более правильную и универсальную модель, исключить погрешности при измерениях или выявить какие-то особенности. Также необходимо учитывать температурные зависимости полупроводниковых приборов. Построенная модель должна максимально приближенно воспроизводить реальное изменение характеристик и параметров при изменении температуры. Данные моменты будут включены в задачи по разработке приложения.

После проведения экстракции всех параметров и подбора их оптимальных значений итогом работы приложения будет являться текстовый документ, описывающий сформированную SPICE-модель, совокупность моделей будет составлять библиотеку. Цель – максимально точные модели и их успешное применение при моделировании.

### References

1. Sischka F. Eine Methode zur Bestimmung der SPICE-Parameter für bipolar Transistoren // AEU. – 1985. В. 39. №. 4. p. 225-232.
2. Charles E. Hymowitz, Kenneth Horita, Jeff T. Robson, Kirk T. Ober, Definitive Handbook of Transistor Modeling, 1986.
3. Baumann, P.: Parameterextraktion bei Halbleiterbauelementen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.

© Шевелева А. А., Маринушкин П. С., 2023



**Секция**

**«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 629.78

## АНАЛИЗ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»

М. Д. Евтифьев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: emd1958@mail.ru

*В докладе проводится анализ наземной экспериментальной отработки орбитального корабля «Буран», которая стала залогом его успешного полета и автоматической посадки.*

*Ключевые слова: наземная экспериментальная подготовка, контроль, испытания, орбитальный корабль.*

## ANALYSIS OF GROUND-BASED EXPERIMENTAL DEVELOPMENT THE BURAN ORBITER

M. D. Evtifyev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: emd1958@mail.ru

*The report analyzes the ground-based experimental testing of the Buran orbiter, which became the key to its successful flight and automatic landing.*

*Keywords: ground-based experimental training, control, testing, orbiter.*

Наземная экспериментальная отработка орбитального корабля (ОК) «Буран» (изделие 11Ф35 1К.1) началась с началом проектирования корабля и продолжалась в течение 12 лет до старта ракеты-носителя (РН) «Энергия» с ОК «Буран».

Для проведения наземной экспериментальной отработки были созданы: около сотни экспериментальных установок, семь комплексных моделирующих стендов, пять летающих лабораторий и шесть полноразмерных макетов орбитальных кораблей. Для отработки технологии сборки корабля, макетирования его систем и агрегатов, примерки с наземным технологическим оборудованием были созданы два полноразмерных макета корабля ОК-МЛ-1 и ОК-МТ. Макет ОК-МЛ-1 (изделие 4М, 11Ф35МЛ1, 0.04), доставленный на космодром в декабре 1983 года, для частотных испытаний как отдельно, так и в сборке с РН, для проведения предварительных примерочных работ с оборудованием монтажно-испытательного корпуса, с оборудованием посадочного комплекса, посадочного комплекса и универсального комплекса стенд-старт.

Макет ОК-МТ (изделие 4МТ, 11Ф35МТ, 0.15), доставленный на космодром в августе 1984 года, для конструкторского макетирования бортовых и наземных систем, примерки и отработки механотехнологического оборудования, отработки технологии подготовки к пуску и послеполетного обслуживания. Эти макеты обеспечили проведение подготовки к пуску ОК «Буран» без существенных замечаний [5, 6].

Для горизонтально-летных испытаний (ГЛИ), которые включали в себя отработку посадки в ручном и автоматическом режимах, проверку летно-технических характеристик на дозвуковых режимах полета, проверку устойчивости и управляемости, отработку системы управления при реализации в ней штатных алгоритмов посадки, был создан аналог корабль ОК-ГЛИ (БТС-002, изделие 0.02, БТС-02 (Большой транспортный самолёт второй)) с четырьмя турбореактивными двигателями. Испытания ОК-ГЛИ проводились в ЛИИ с ноября 1985 года по апрель 1988 года. Было проведено 24 полета

и 17 из них в режиме автоматического управления до полного останова на взлетно-посадочной полосе [1, 5, 6].

Кроме ОК-ГЛИ отработку участка посадки проводили на двух специально оборудованных летающих лабораториях Ту-154ЛЛ. На них было выполнено 140 полетов, в том числе 69 автоматических посадок на аэродроме ЛИИ и посадочном комплексе Байконура [1, 5, 6].

Самой большой по объему и сложности экспериментальная отработка была проведена на комплексном стенде КС-ОК (изделие ЗМ, 0.03, КС-35, 11Ф35КС). Комплексный стенд был полноразмерным аналогом ОК «Буран», укомплектованный штатными по составу бортовыми системами, и имел штатный комплект наземного испытательного оборудования. Электрические испытания на КС-ОК начались в марте 1984 года [4, 5].

Все электрические испытания бортовых систем подразделялись на этапы:

– входного контроля аппаратуры бортовых систем перед установкой на корабль в лабораториях входного контроля с помощью специализированной контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) в объеме автономных испытаний (АИ);

– проверочные включения (ПВ, при подготовке к первому полету) части бортовых систем в объеме АИ после монтажа на корабль на участке сборки;

– комплексные электрические испытания (КЭИ) на технической позиции (ТП) ОК и ТП РН, обеспечивающие проверки работоспособности всех бортовых систем и правильность их функционирования при имитации режимов [4, 5].

Автору этого доклада посчастливилось принять участие в электрических испытаниях, как на КС-ОК, так и на Байконуре на штатном изделии [2, 3].

ОК «Буран» для электроиспытаний оказался исключительно сложным объектом. В его состав входило 50 бортовых систем, большая часть которых в процессе предстартовой подготовки и на отдельных участках полета функционировали одновременно.

В составе бортовых систем ОК было более 600 установочных единиц бортовой аппаратуры, включающей свыше 1000 приборов, 1500 трубопроводов и 2500 сборок (жгутов бортовой кабельной сети) БКС и более чем 14000 электрических соединений (штепсельных разъемов) [4, 5].

Особенностью «Бурана», как объекта контроля было наличие в составе СУ многомашинной БЦВК с ПМО. Для первого полета ПМО БЦВК составило 180 Кбайт, что позволило реализовать более 6000 команд и 3000 алгоритмов управления бортовыми системами и обеспечить с помощью развитой системой контроля и диагностики (СКД) автоматическое парирование рассмотренных нештатных ситуаций [4, 5].

#### Заключение

1. На КС-ОК было отработано 189 разделов комплексных испытаний и было выявлено и устранено 21168 замечаний. Работы велись круглосуточно без выходных и составили по объему 1600 суток, что позволило значительно уменьшить число замечаний на штатном изделии [4, 5].

2. За всё время экспериментальной отработки ОК «Буран» на космодроме Байконур было выявлено и устранено 15000 замечаний к материальной части корабля, наземному испытательному и технологическому оборудованию, бортовому и наземному программному обеспечению, эксплуатационной документации, работе операторов [4, 5].

3. 29 октября 1988 года при наборе готовности к старту за 51 секунду до старта сработала система аварийного отмена старта из-за того что не отошла плата раскрутки гироскопов. Это подтвердило правильность предварительных испытаний по проверке систем отвечающих за подготовку к старту.

4. И самое основное подтверждение правильности принятых технологических и организационных решений в экспериментальной отработке ОК «Буран» было 15 ноября 1988 года, когда корабль совершил первый полет в два витка и в автоматическом режиме сел на ВПП аэродрома «Юбилейный» без значительных замечаний. Здесь надо говорить про качественную подготовку корабля к полету и посадки [1, 4, 5].

#### Библиографические ссылки

1. Бровкин, А.Г., Кравец, В.Г. Автоматическая посадка беспилотного многоразового орбитального корабля «Буран» / А.Г. Бровкин, В.Г. Кравец // Космическая техника и технологии. 2014, № 1(4). С. 75-85

2. Евтифьев, М.Д. Как мы готовили к полету орбитальный корабль «Буран» / М.Д. Евтифьев // История науки и техники. 2006, № 6. С. 38-42.
3. Евтифьев, М.Д. Электрические испытания орбитального корабля «Буран». Как это было / М.Д. Евтифьев // ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск 26-28 февраля 2022 г. Под общ. ред. В.П. Назарова. СибГУ им. М.Ф. Решетнёва. Красноярск, 2020. С.84-97.
4. Многооборотный орбитальный корабль «Буран» / Ю.П. Семенов, Г.Е. Лозино-Лозинский, В.Л. Лапыгин, В.А. Тимченко и др.; Под ред. Ю.П. Семенова и др. – М.: «Машиностроение», 1995. 448 с.
5. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева / Гл. ред. Ю.П. Семенов. Королев Моск. обл.: РКК «Энергия». 1996. 672 с.
6. Шабанов В.К. Экспериментальная отработка «Бурана» / В.К. Шабанов // Авиационно-космические системы: Сборник статей под ред. Г.Е. Лозино-Лозинского и А.Т. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 1977. – С. 261-267.

### References

1. Brovkin, A.G., Kravets, V.G. Automatic landing of the unmanned reusable orbiter "Buran" / A.G. Brovkin, V.G. Kravets // Space technology and technologies. 2014, No. 1(4). pp. 75-85
2. Evtifyev, M.D. How we prepared the Buran orbiter for flight / M.D. Evtifyev // History of Science and Technology. 2006, No. 6. pp. 38-42.
3. Evtifyev, M.D. Electrical tests of the Buran orbiter. As it was / M.D. Evtifyev // TESTS, DIAGNOSTICS, RELIABILITY. THEORY AND PRACTICE. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference. Krasnoyarsk February 26-28 , 2022 Under the general editorship of V.P. Nazarov. SibGU named after M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2020. pp.84-97.
4. Reusable orbiter "Buran" / Yu.P. Semenov, G.E. Lozino-Lozinsky, V.L. Lapygin, V.A. Timchenko, etc.; Edited by Yu.P. Semenov et al. – М.: "Mechanical Engineering", 1995. 448 p.
5. S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia / Chief Editor Yu.P. Semenov. Korolev Moscow Region: RSC Energia. – 1996. 672 p.
6. Shabanov V.K. Experimental development of "Buran" / V.K. Shabanov // Aerospace systems: Collection of articles edited by G.E. Lozino-Lozinsky and A.T. Bratukhin. – М.: Publishing House of MAI, 1977. pp. 261-267.

© Евтифьев М. Д., 2023

УКД 629.7.017

## ПРОБЛЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

О. В. Крашенинникова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: olesya.krash@mil.ru

*В работе рассматриваются проблема получения достоверных характеристик при проведении испытаний ракетно-космической техники. Перечислены причины, из-за которых сложно получить точные результаты испытаний. Приведены методы, с помощью которых можно улучшить достоверность получаемых характеристик.*

*Ключевые слова: летательные аппараты, ракетно-космическая техника, испытания ракетно-космической техники, характеристики летательных аппаратов, достоверность характеристик, проведения испытаний для ЛА.*

## THE PROBLEM OF OBTAINING RELIABLE CHARACTERISTICS DURING TESTS FOR ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

O. V. Krasheninnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: olesya.krash@mil.ru

*The paper considers the problem of obtaining reliable characteristics during tests of rocket and space technology. The reasons why it is difficult to obtain accurate test results are listed. The methods by which it is possible to improve the reliability of the obtained characteristics are given.*

*Keywords: aircraft, rocket and space technology, tests of rocket and space technology, characteristics of aircraft, reliability of characteristics, testing for aircraft.*

Проведение испытаний остается актуальным при разработке и производстве ракетно-космической техники. Все виды летательных аппаратов (ЛА) должны проходить процедуры сертификации [1], предписанные регулируемыми органами. Испытания являются неотъемлемой частью этого процесса. Испытания позволяют убедиться в безопасности летательного аппарата перед его эксплуатацией. Проведение испытаний может помочь выявить и устранить проблемы на ранних стадиях разработки, что в конечном итоге может сэкономить ресурсы и снизить затраты на обслуживание и ремонт ракетно-космической техники. Так же испытания позволяют инженерам оценивать эффективность улучшений для надежности летательных аппаратов.

При проведении испытаний для летательных обращают внимание на множество характеристик и параметров, чтобы убедиться в её надежности, производительности и безопасности. Испытания могут проводиться как на наземном стенде, пример которого изображен на рис. 1 [2], так и в космосе. Ключевыми характеристиками, которые подвергаются анализу являются: тяга двигателя ЛА, исправность системы электропитания, прочность конструкции, способность летательного аппарата выдерживать тепловые нагрузки. Оценивается точность систем навигации и управления. Оценивается срок службы и работоспособность топливных систем. Исследуются аэродинамические особенности и др. Эти характеристики и параметры могут варьироваться в зависимости от конкретной миссии, но общий принцип заключается в том, чтобы обеспечить успешное выполнение задачи при максимальной безопасности и эффективности.

План испытаний состоит из нескольких этапов. Сначала проводится предварительное проектирование, на этом этапе определяются цели испытаний и определяются необходимые ресурсы и оборудование. Далее проверяется работоспособность компонентов и подсистем самолета. После этого проводятся полетные испытания, в процессе которых летательный аппарат выполняет серию полетов, чтобы проверить его характеристики в реальных условиях полета. Это включает в себя испытания скорости, маневренности, управляемости и других параметров.



Рис. 1. Испытательный стенд реактивных двигателей Rolls-Royce

Существует несколько причин, по которым может быть трудно получить достоверные характеристики при проведении испытаний летательных аппаратов:

1) Сложности с созданием экстремальных условий. В процессе проведения испытаний летательных аппаратов сложно создать всевозможные экстремальные условия, в которых может оказаться летательный аппарат. Например, ракетно-космическую технику, находящуюся в космосе, может ожидать повышенное излучение. Радиация может оказать разрушительное влияние на электронику и другие чувствительные компоненты.

2) Неопределенность и случайность. Некоторые факторы, такие как неожиданные аэродинамические эффекты или метеорологические изменения, могут быть трудно предсказуемыми и создавать дополнительную неопределенность в данных. Изменение погодных условий, таких как ветер, температура, влажность и давление, может влиять на аэродинамические характеристики летательного аппарата. Например, сильный боковой ветер может изменить траекторию полета и привести к изменениям в управляемости.

3) Человеческий фактор. Результаты испытаний могут оказываться недостоверными из-за влияния человеческого фактора. Действия операторов или пилотов могут влиять на результаты испытаний, малейшие ошибки в управлении летательным аппаратом или неправильное взаимодействие членов команды могут исказить полученные характеристики. К тому же, для получения достоверных характеристик ракетно-космической техники требуется собирать и анализировать большое количество данных, что повышает вероятность ошибки из-за невнимательности.

Для повышения точности характеристик летательных аппаратов при испытаниях можно применить несколько подходов. Использование цифровых двойников [3] для виртуального тестирования компонентов ракетно-космической техники, таких как системы автопилотирования. Это позволяет предсказать возможные проблемы эксплуатации конкретных моделей летательных аппаратов и вно-

сить необходимые изменения в их конструкцию. Виртуальные испытания, проводимые на цифровых двойниках позволяют моделировать различные сценарии и условия полета. Они могут сократить затраты времени и ресурсов на физические испытания и получить предварительную оценку характеристик летательного аппарата. Проведение испытаний на цифровых двойниках позволяет избежать риска для жизни и здоровья испытуемых и персонала, так как не требует физического присутствия на месте испытаний. Также важна систематическая проверка и повторное тестирование. Повторные испытания при различных условиях позволяют убедиться в достоверности полученных результатов и выявить возможные погрешности. При проведении испытаний ракетно-космической техники лучше применять высокоточные измерительные приборы, так как датчики, чтобы получить более достоверные данные о характеристиках летательных аппаратов.

Важно отметить, что повышение точности характеристик при испытаниях ракетно-космической техники требует комплексного подхода и соблюдение всех необходимых требований. Также важно учитывать все особенности и условия эксплуатации летательного аппарата для получения максимально достоверных данных.

### Библиографические ссылки

1. Статья 10. Обязательная сертификация и декларирование соответствия космической техники [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/136323/3d3a9e2eb4f30c73ea6671464e2a54b5/> (дата обращения: 03.09.2023).
2. Откуда двигатель у самолета [Электронный ресурс]. URL: <https://rblogger.ru/2018/04/23/otkuda-dvigatel-u-samoleta/> (дата обращения: 03.09.2023).
3. Цифровой двойник: что это, примеры, применение. [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (дата обращения: 04.09.2023).

### References

1. Stat'ya 10. Obyazatel'naya sertifikaciya i deklarirovanie sootvetstviya kosmicheskoy tekhniki. Available at: <https://base.garant.ru/136323/3d3a9e2eb4f30c73ea6671464e2a54b5/> (accessed 03.09.2023).
2. Otkuda dvigatel' u samoleta. Available at: <https://rblogger.ru/2018/04/23/otkuda-dvigatel-u-samoleta/> (accessed 03.09.2023).
3. Cifrovoy dvojniki: chto eto, primery, primeneniye. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (accessed 04.09.2023).

© Крашенинникова О. В., 2023

УДК 681.3

## КОНТРОЛЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АТТЕСТАЦИИ КАМЕР ТЕПЛА И ХОЛОДА

А. Н. Митрофанова, Е. А. Жирнова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: anastasia\_450545@mail.ru

*Разработан процесс измерения и контроля метрологических параметров камер тепла и холода, установлены основные операции при аттестации испытательного оборудования.*

*Ключевые слова: испытательное оборудование, аттестация, метрологические характеристики.*

## CONTROL OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS DURING CERTIFICATION OF HEAT AND COLD CHAMBERS

A. N. Mitrofanova, E. A. Zirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: anastasia\_450545@mail.ru

*The process of measuring and monitoring the metrological parameters of heat and cold chambers is considered, and the main operations during the certification of testing equipment are established.*

*Keywords: test equipment, certification, metrological characteristics.*

При испытаниях ракетно-космической продукции необходимо имитировать различные климатические условия. Климатическая камера тепла КТ-12,0 и холода КХ-12,0 (далее – камеры), предназначены для воспроизведения климатических условий испытаний, в которых воспроизводимым фактором является температура. Технические требования к камерам представлены в руководстве по эксплуатации [1,2].

Повышенные и пониженные температуры представляются одними из самых распространенных факторов, влияющих на прочностные и эксплуатационные свойства материалов. Поэтому важно заранее предусмотреть, как те или иные условия способны изменить параметры изделия. Для определения метрологической пригодности испытательного оборудования предусмотрена аттестация.

Аттестация испытательного оборудования – это определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации [3].

Установление требований к метрологическим характеристикам измеряемых параметров является основой работ при разработке методики и программы аттестации испытательного оборудования.

Основным параметром камер, подлежащий контролю, регулировке и периодической проверке является температура в камере. На основе анализа технической документации камер тепла и холода разработан технологический процесс измерения и контроля метрологических параметров камер тепла и холода (табл. 1.)

Исходя из контролируемых параметров, определяем основные операции, проводимые при аттестации камер тепла и холода в качестве испытательного оборудования. Перечень данных операций приведен в табл. 2.

Таблица 1

**Операции и приборы контроля метрологических параметров камер тепла и холода**

№ операции	Название операции	Приборы/ методы
001	Контроль параметров, характеризующих условия проведения аттестации	Прибор комбинированный Testo-622
002	Определение временных характеристик изменения температуры	Секундомер СТЦ-1
003	Определение характеристик камер в режиме воспроизведения температуры	Измеритель-регулятор многоканальный прецизионный МИТ-8.10М1 Термометр сопротивления платиновый ТСРВ-1.1

Таблица 2

**Операции, выполняемые при аттестации камер тепла и холода**

Наименование операции	Обязательность при проведении первичной аттестации
1. Проверка документации на камеры	+
2. Внешний осмотр	+
3. Проверка выполнения требований по безопасности	+
4. Опробование	+
5. Контроль параметров, характеризующих условия проведения аттестации	+
6. Определение характеристик воспроизведения условий испытаний камерой	+

Таким образом, если результаты аттестации подтверждают, что контролируемые параметры испытательной установки соответствуют установленным метрологическим операциям, то камеры тепла и холода годны для применения в качестве испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции.

**Библиографические ссылки**

1. Руководство по эксплуатации камера тепла КТ-12,0. СМ 040.044 РЭ
2. Руководство по эксплуатации камера холода КХ-12,0. СМ 040.043 РЭ
3. ГОСТ Р 8.568-2017 «ГСОЕИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения». М., Стандартинформ, 2017.

**References**

1. Operating Manual Heat chamber CT-12.0. СМ 040.044 RE;
2. Operating Manual cold chamber CH-12.0. СМ 040.043 RE;
3. GOST R 8.568-2017 "GSOEI. Certification of test equipment. Basic provisions". М., Standartinform, 2017.

© Митрофанова А. Н., Жирнова Е. А., 2023

УДК 681.3

## ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ КАМЕРА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Г. А. Муродов, А. А. Муминов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443031, г. Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: murodov.m22@mail.ru

*В данной научной статье рассматриваются современные тенденции и технологии в области систем испытаний деталей эксплуатирующим в авиации. Анализируется важность и значимость таких систем в авиационной промышленности, приводятся примеры типовых испытаний и методик тестирования. В статье также обсуждаются перспективы развития данной области и рекомендации по дальнейшим исследованиям.*

*Ключевые слова: системы, технологии, безопасность, камера, испытания, авиация.*

## TEST CHAMBER FOR SMALL-SIZED AIRCRAFT PRODUCTS

G. A. Murodov, A. A. Muminov

Samara National Research University named after academician S. P. Korolyov  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443031, Russian Federation  
E-mail: murodov.m22@mail.ru

*This scientific article discusses current trends and technologies in the field of testing systems for parts operating in aviation. The importance and significance of such systems in the aviation industry is analyzed, examples of standard tests and testing methods are given. The article also discusses the prospects for the development of this field and recommendations for further research.*

*Keywords: systems, technology, security, camera, testing, aviation.*

**Введение.** Авиационная промышленность является одной из наиболее технически сложных и жестко регламентированных отраслей, где безопасность и надежность имеют первостепенное значение. Прежде чем использовать детали, необходимо провести их испытание в лаборатории при условиях, аналогичных условиям использования в реальной среде. К примеру, при создании двигателей нужно провести испытание на жаростойкость и холодостойкость, и даже после создания самолета перед эксплуатацией проводят испытательные полеты. Целью исследования было проектирование испытательной камеры, в которой можно проводить испытания различных авиационных деталей. Суть в том, что рабочий режим созданного оборудования должен соответствовать требующимся условиям при эксплуатации в реальной среде. Таким образом, предварительные испытания продукции являются неотъемлемой частью процесса контроля качества продукции. А предварительный контроль качества – это необходимый элемент управления качеством выпускаемой продукции. Испытание является важнейшим этапом при создании новой выпускаемой продукции, модернизации существующей и эксплуатации выпускаемой продукции из производства [1].

На сегодняшний день создано большое количество испытательного оборудования для различных отраслей. Сегодня на рынке испытательных камер можно встретить большое количество разновидностей испытательных камер, от маленьких до больших по размеру. Современные испытательные камеры позволяют проводить различные виды испытаний, такие как теплостойкость и холодостойкость. Данная испытательная камера и ее возможности, и функциональность улучшены с использованием современных технологий [2].

Разработанная испытательная камера проектировалась как сверхпрочный, высоконадежный и герметичный объект вакуумной техники, воспроизводящий различные условия, необходимые для определения характеристик компонентов, таких как датчики, электронные компоненты и малогабаритные системы, при разных условиях [3].

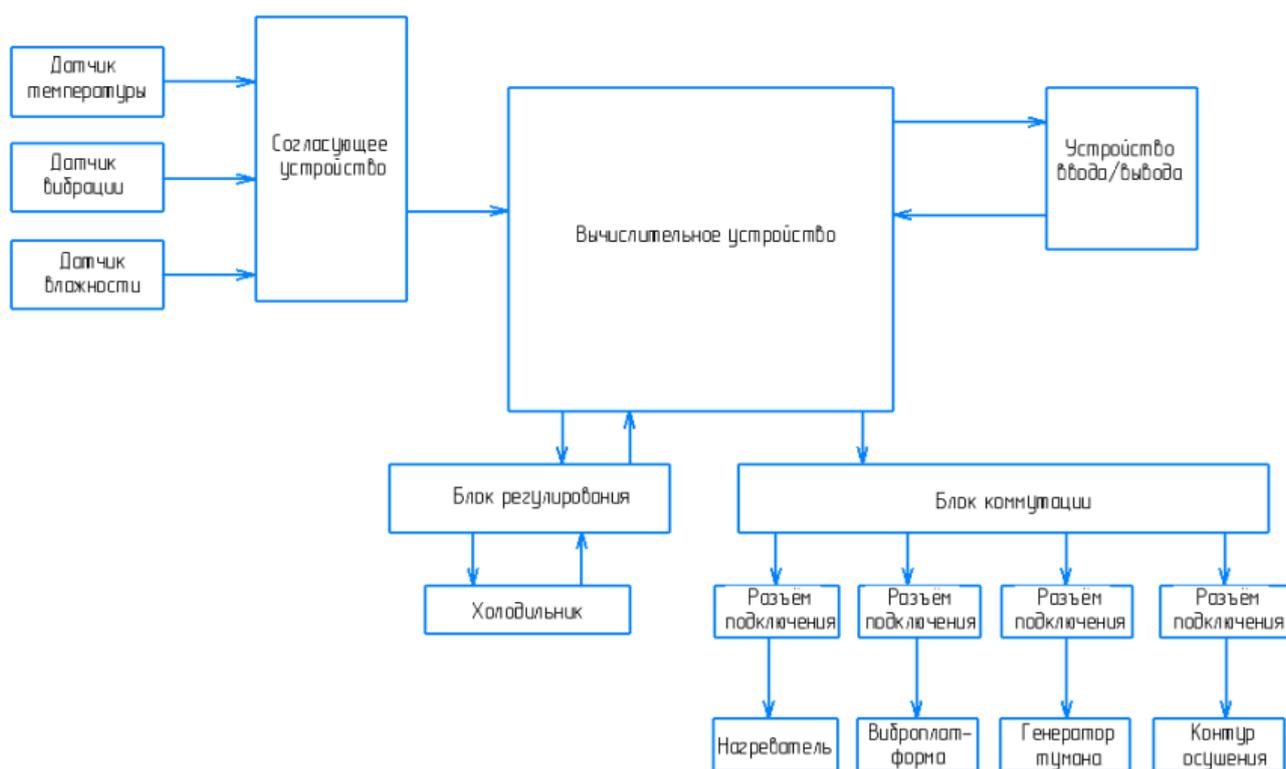
Камеру можно использовать продолжительное время и в ней проводить проверки систем, такие как:

1. Тепловые испытания.
2. Вибрационные испытания.
3. Акустические испытания.
4. Испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС). Испытательная камера имеет следующие характеристики:

Имеет следующие характеристики:

- 1) Размеры рабочей камеры (Ш×В×Г): 300х300х350;
- 2) Диапазон поддерживаемых температур (-60 °С ~ +120 °С);
- 3) Поддерживаемый диапазон относительной влажности (20 ~ 98%);
- 4) Регулируемая температура влажности ( $\pm 0,3$  °С /  $\pm 0,5\%$  отн.);
- 5) Однородность температуры влажности при относительной влажности более 75% – 4%, при относительной влажности менее 75% – при пустой камере, через 30 минут после стабилизации;
- 6) Регулируемый диапазон частот синусоидальных колебаний 3 ~ 2000 Гц;
- 7) Максимальное смещение вибростолы 25 мм;
- 8) Номинальное усилие вибростенда 200 Н и так далее. В статье изучено и предложена испытательная камера, выполняющая ряд важных функций и задач в авиационной промышленности [4].

На рис. представлено функциональная схема испытательной камеры.



Функциональная схема оснастки испытательной камеры

В заключение следует отметить, что испытательные камеры для авиационных деталей, играют важную роль в обеспечении надежности, безопасности и эффективности летательных аппаратов. Развитие технологий в этой области будет продолжаться, что открывает большие возможности и новые горизонты для исследований и совершенствования компонентов летательных аппаратов, способствуя развитию авиационной промышленности в целом.

### Библиографические ссылки

1. А.Г. Галеев, Ю.В. Захаров, В.П. Макаров, В.В. Родченко, Москва издательство МАИ 2014. 283 с. " проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники".
2. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Метод экстраполяции на ненаблюдаемые «хвосты» распределений вероятностей точностных характеристик летательного аппарата.
3. Михайлов С.А., Неделько Д.В., Шакиров М.З. Вероятностные принципы обеспечения статической прочности и долговечности сложных регулируемых вертолетных конструкций.
4. Ван Ч.Ц., Кретов А.С. Алгоритм оптимизации нагретых тонкостенных авиаконструкций на основе многоуровневой проектировочной модели.

### References

1. A.G. Galeev, Yu.V. Zakharov, V.P. Makarov, V.V. Rodchenko, Moscow MAI Publishing House 2014. 283 p. "DESIGN of test benches for experimental testing of objects of rocket and space technology".
2. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI (KNITU-KAI). Alexandrovskaya L.N., Kirillin A.V. Method of extrapolation to unobservable "tails" of probability distributions of precision characteristics of an aircraft.
3. Mikhailov S.A., Nedelko D.V., Shakirov M.Z. Probabilistic principles of ensuring static strength and durability of complex adjustable helicopter structures.
4. Wang Ch.Ts., Kretov A.S. Optimization algorithm of heated thin-walled aircraft structures based on a multilevel design model.

© Муродов Г. А., Муминов А. А., 2023

УДК:629.78.015

## СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИБОРОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

А. С. Орлов, С. А. Орлов, А. В. Пасько

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

*В докладе рассматривается стенд для испытаний приборов и оборудования на высокоинтенсивные ударные воздействия по методу ударных спектров ускорений. Показано, что предлагаемый ударный стенд позволяет проводить ударные испытания в трех взаимно перпендикулярных направлениях без разработки сложной оснастки.*

*Ключевые слова: стенд, испытания, удар, ударный спектр, приборы, оборудование.*

## HIGH INTENSITY IMPACT TEST FIXTURE TO TEST THE SPACECRAFT INSTRUMENTS AND HARDWARE

A. S. Orlov, S. A. Orlov, A. V. Pasko

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

*It is discussed a shock test fixture to subject the SC Instruments and Equipment to the high intensity impacts using the shock acceleration spectra method. It is shown that a proposed design of shock test fixture allows to conduct the shock load tests in three mutually perpendicular directions without the development of complex test hardware.*

*Keywords: stand, tests, impact, shock spectrum, instruments, equipment.*

Существует достаточно много различных стендов для испытаний на ударные воздействия. Использование конкретных типов стендов в каждом случае испытаний зависит, от типа воспроизводимой нагрузки. В настоящее время наибольшее применение при испытаниях аппаратуры и оборудования находят системы на базе механических (копровых) стендов (баллистических, с падающими столами и т. д.) [1-4].

Типовой стенд состоит из молота, подвески молота, поворотной траверсы, станины, фиксирующего устройства, наковальни для монтажа оборудования, выполненной в виде прямоугольной сменной металлической панели, виброизолирующих прокладок, регистрирующих датчиков. Однако такие стенды имеют ряд существенных недостатков при испытаниях перпендикулярно плоскости крепления оборудования. Для крепления объекта испытаний используется специальная оснастка, причем к ней предъявляются высокие требования по жесткости, массе и т. д. Такая схема испытаний усложняет формирование необходимого режима нагружения, т.к. оснастка вносит искажения испытательного режима за счет собственных резонансов. Кроме того, фактическое увеличение массы объекта испытаний (за счет массы оснастки) требует существенного увеличения самого ударного воздействия, что вводит дополнительные ограничения на воспроизводимые режимы нагружения. В рассматриваемом стенде наковальня выполнена в виде короба, состоящего из прямоугольных металлических панелей с вырезами жестко соединенных между собой, например, сваркой и сменного днища с установленным на нем на внутренней поверхности, объектом испытаний и скрепленного с коробом болтами. Между коробом и днищем устанавливают сменные виброизолирующие прокладки, а крешеры устанавливают на внешней поверхности днища в разных местах.

При этом плита с вырезами обеспечивает необходимую форму ударного спектра ускорений (в первую очередь точку перегиба спектра и равномерность воспроизводимого ударного спектра), а скорость соударения молота и плитой обеспечивает нужную амплитуду ускорений. Свободная поверхность днища со стороны маятника позволяет выполнять удар в любую точку днища.

Приложение ударного воздействия через крешеры (при отработке режимов испытаний на динамическом макете) в различных точках днища позволяет возбуждать различные формы колебаний днища для формирования требуемого ударного спектра ускорений, и выбрать точку приложения ударного воздействия, обеспечивающую наилучшее формирование необходимого ударного спектра ускорений. Регистрирующие датчики устанавливаются как с внутренней, так и с внешней стороны днища, что позволяет контролировать нагружение во всех точках крепления объекта испытаний.

До начала испытаний проводится расчет необходимых параметров короба, днища (необходимые параметры панелей короба, толщины днища, размеры и местоположение вырезов) и скорости соударения молота с днищем. Расчеты проводились с использованием метода конечных элементов (нелинейная модель демпфирования). Расчеты были выполнены для различных конфигураций панелей: сплошной плиты (без вырезов), с различными типами размерами вырезов и толщинами панелей, что позволило определить необходимые размеры плиты стенда для испытаний прибора. Данный стенд позволяет проводить испытания приборов массой до 20кг с уровнями ударных воздействий по ударному спектру ускорений до 5000g.

В докладе приводятся результаты испытаний приборов различной массы и габаритов, рассматриваются возможные модификации стенда.

#### Библиографические ссылки

1. Вибрации в технике, справочник в 6 томах. Том 5. Измерения и испытания под редакцией М.Д.Генкина М. Машиностроение 1981-496с.
2. S.A. Orlov, K.A. Matveev and G.I. Rastorguev Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131.
3. Усанов А.Ю., Козубский К.Н., Орлов С.А., Стенд для испытаний на высокоинтенсивные ударные воздействия приборов и оборудования Пат. №2628450 РФ, МПК G01M 7/08.Опубл.17.08 2017.
4. ECSS-E-HB-32-26A. Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook, 19February, 2013 – 636p.

#### References

1. Six-Volume Book of Reference on Vibration in Technology., Vol. 5., Measurements and Tests, edited by M.D. Genkin, Mashinostroenie Publisher, Moscow (1981), pp. 496.
2. Orlov S.A., Matveev K.A., and Rastorguev G.I., Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131.
3. Usanov A.Yu., Kozubsky K.N., Orlov S.A., Stand for testing high-intensity shock effects of instruments and equipment Pat. No. 2628450 of the Russian Federation, IPC G01M 7/08. Published on August 17, 2017.
4. ECSS-E-HB-32-26A. Space Engineering., Spacecraft Mechanical Loads Analysis Handbook, February 19, 2013 – 636p.

© Орлов А. С., Орлов С. А., Пасько А. В., 2023

УДК 629.7.085.22

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ СТАРТОВОЙ УСТАНОВКИ И ПУТИ ЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

В. А. Салтыков, А. К. Юманов, Д. Р. Позняк, О. И. Голованских

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1  
E-mail: yumanov\_ak\_work@mail.ru

*По итогу испытаний был сделан вывод, что конструкция выполнила поставленную задачу в полном объеме, однако была выявлена необходимость дальнейшей модернизации некоторых элементов конструкции.*

*Ключевые слова: конструкция, стартовая установка, анализ, модернизация, испытания.*

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF TESTING THE LAUNCHING INSTALLATION AND WAYS FOR ITS IMPROVEMENT

V. A. Saltykov, A. K. Iumanov, D. R. Poznyak, O. I. Golovanskih

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov  
1, 1-st Krasnoarmeiskaya, Saint-Petersburg, 190005. Russia Federation  
E-mail: yumanov\_ak\_work@mail.ru

*Based on the results of the tests, it was concluded that the design fulfilled the task in full, but the need for further modernization of some structural elements was identified.*

*Keywords: construction, launch system, analysis, modernization, tests.*

**Введение.** В рамках подготовки ко Всероссийскому чемпионату от Госкорпорации Роскосмос «CanSat в России» была разработана и изготовлена стартовая установка, с которой был произведен запуск ракеты метеорологического зондирования Земли весом 6 кг. Запуск прошел успешно, поставленные задачи были выполнены в полном объеме. По итогам испытания были выявлены узлы конструкции, которые в дальнейшем требуют модернизации.

Цель работы – анализ результатов испытания, анализ узлов конструкции, требующих модернизации. В рамках поставленной цели необходимо решить следующие задачи: исследование результатов испытания, оценка предложенных вариантов модернизации.

**Основная часть.** Испытания включали в себя транспортировку, сборку конструкции в полевых условиях, запуск ракеты со стартовой установки. При сборке были выявлены следующие недочеты в конструкции: высокая хрупкость печатных изделий из пластика, сложность установки в полевых условиях, устранение зазоров на стыке (рисунок 3).

Для решения проблемы хрупкости печатных изделий (рисунок 1) предлагается заменить их аналогичными металлическими изделиями. Изготовление таких деталей экономически нецелесообразно, как и изготовление подобных деталей из стандартных заготовок. Поэтому было принято решение изготовить аналогичные элементы из стандартных изделий.

Сложность установки конструкции (рисунок 2) включает в себя несколько аспектов:

- регулирование эксплуатационного положения;
- фиксация распорных элементов.

Для решения первого аспекта предлагается использовать элементы для регулировки длины ножек. Для второго аспекта предлагается изменить углы распорных элементов и уменьшить их диаметр.

Для устранения зазоров (рисунок 3) в направляющем элементе было предложено использовать вставку. Данная вставка помимо устранения зазора так же поможет устранить перекос частей направляющей при сборке.



Рис. 1. Демонстрация хрупкости крепления



Рис. 2. Сложность установки распорных элементов



Рис. 3. Зазор на стыке направляющей

**Заключение.** По результатам анализа результатов полевых испытаний были утверждены варианты модернизации конструкции для устранения выявленных недочетов.

### Библиографические ссылки

1. Салтыков, В. А. Стартовая установка для запуска ракеты с метеорологическим зондом / В. А. Салтыков, О. И. Голованских, Д. Р. Позняк // Гагаринские чтения – 2023: Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции, Москва, 11–14 апреля 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 458-459.
2. Разработка стартового стола ракеты-носителя для метеорологического зондирования / В. А. Салтыков, О. И. Голованских, А. К. Юманов, Д. Р. Позняк // Третья научно-техническая конференция проектов Центра научно-технического творчества студентов: Материалы конференции, Санкт-Петербург, 30 января 2023 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2023. – С. 36-39.
3. Н. Н. Романюк, доцент К. В. Сашко, В. А. Агейчик, А. И. Оскирко, А. Л. Вольский, П. В. Клавсуть. Подъемно-транспортные машины и механизмы. Подъемно-транспортные машины и механизмы. Минск: БГАТУ, 2015.

### References

1. V.A. Saltykov, O.I. Golovanskih, D.R. Poznyak [Launch pad for launching a rocket with a meteorological probe]. *XLIX Gagarin Science Conference MAI*. 2023, No 49., p. 458-459 (In Russ.). Available it: <https://gagarin.mai.ru/files/2023/abstracts2023.pdf>
2. V.A. Saltykov, A.K. Iumanov, D.R. Poznyak, O.I. Golovanskih [Development of the launch table of the launch vehicle for meteorological sounding]. *VOENMEH Vestnik BSTU.*, 2023 No. 93, P. 36-39. (In Russ.). Available it: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54372752>
3. Romanuk N.N., Sashko K.V., Ageichikov V.A., Oskirko A.I., Volskui A.L., Klavsyty' P.V. *Pod'emno-transportnye mashiny i mekhanizmy. Pod'emno-transportnye mashiny i mekhanizmy* [Lifting and transportation machines and mechanisms]. Minsk, BSATU, 2015.

© Салтыков В. А., Юманов А. К., Позняк Д. Р., Голованских О. И., 2023

УДК 629.78; 536.33

## СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ТЕРМОВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

Е. В. Юртаев<sup>1</sup>, А. А. Шевчук<sup>1,2\*</sup>, О. В. Пастушенко<sup>1</sup>, В. В. Двирный<sup>1,2,3</sup>, Г. В. Двирный<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

*Предложен метод термовакuumных испытаний космических аппаратов с использованием имитатора солнечного излучения, позволяющий повысить энергоэффективность и значительно сократить время проведения термовакuumных испытаний.*

*Ключевые слова: термовакuumные испытания, термовакuumная камера, имитатор солнечного излучения, секционный нагреватель, криогенный экран.*

## METHOD FOR SIMULATING THE CONDITIONS OF EXTERNAL HEAT EXCHANGE OF SPACECRAFT IN A THERMAL VACUUM CHAMBER

E. V. Yurtaev<sup>1</sup>, A. A. Shevchuk<sup>1,2</sup>, O. V. Pastushenko<sup>1</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1,2,3</sup>, G. V. Dvirniy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup> Siberian Federal University

79, Svobodniy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

*We have proposed a method for thermal vacuum tests of spacecraft using a solar simulator, which allows to increase energy efficiency and significantly reduce the time of thermal vacuum tests.*

*Keywords: thermal vacuum tests, thermal vacuum chamber, solar simulator, sectional heater, cryogenic shroud.*

Одной из проблем термовакuumных испытаний с использованием имитатора солнечного излучения (ИСИ) является расположение крупногабаритных элементов ИСИ между объектом испытаний (ОИ) и криогенными экранами термовакuumной камеры. В случае традиционной компоновки ИСИ с внешним размещением источников излучения такими элементами являются коллимирующие зеркала [1], в предложенной ранее авторами конструкции перспективного ИСИ [1, 2] – массив излучающих секций нагревателей в виде матриц из точечных источников. Как следствие, частичное перекрытие элементами ИСИ криогенных экранов термовакuumной камеры приводит к увеличению времени создания режимов холодных температур или переходных температурных режимов на ОИ.

Для решения проблемы предложен способ, при котором охлаждаемый циркуляцией жидкого азота криогенный экран в виде решетки с высокими поглощающими свойствами устанавливается в термовакuumной камере между ОИ и элементами ИСИ – коллимирующими зеркалами или секциями автономных нагревателей, состоящими из точечных источников излучения. В виде примера на рис. 1 показаны часть криогенного экрана и секций автономных нагревателей – матриц из точечных источни-

ков излучения, на рис. 2 показано размещение массива секций нагревателей и решетки криогенного экрана относительно ОИ.

В режиме горячих температур излучение точечных источников, при условии высокой направленности, с малыми потерями падает через решетку на ОИ. Уровень потерь лучистого потока находится в прямой зависимости от угла его непараллельности, а благодаря высокой поглощательной способности стенок решетки происходит дополнительное спрямление излишне расходящихся лучей. Наоборот, в режиме холодных температур и неработающем ИСИ тепловое излучение ОИ, имеющее исключительно диффузный характер, большей частью поглощается стенками охлаждающей решетки.

Переходные температурные режимы получают совместной работой охлаждающей решетки и секций ИСИ на пониженной мощности.

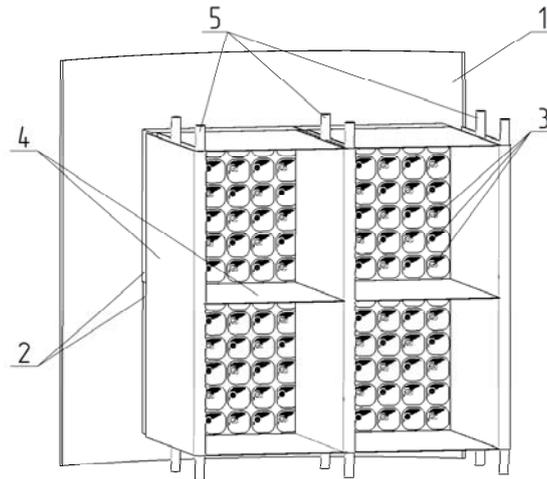


Рис. 1. Криогенный экран и излучатель перспективного ИСИ; вид со стороны ОИ:  
 1 – стенка термовакуумной камеры; 2 – автономные секции нагревателей;  
 3 – точечные источники излучения; 4 – криогенный экран в виде решетки;  
 5 – трубопроводы криогенного экрана с циркуляцией жидкого азота

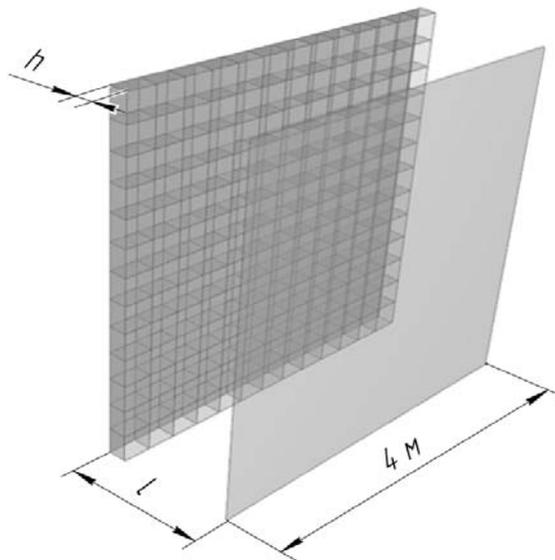


Рис. 2. Размещение нагревателей и криогенного экрана относительно объекта испытаний:  
 1 – объект испытаний; 2 – стенки решетки; 3 – секции автономных нагревателей

На рис. 3 показаны результаты моделирования в специализированном ПО для теплового анализа Thermica. За основу принята рассмотренная ранее в [2] модель перспективного ИСИ с размером ячеек решетки 315 x 315 мм, выполненная в среде для оптического проектирования Zemax Optic Studio и оптимизированная для расстояния до ОИ от 1,5 до 2 м.

Результаты показывают, что соотношение величин пропускания излучения от ИСИ и поглощения теплового излучения от ОИ охлаждающей решеткой определяется глубиной  $h$  её ячеек. Так, при приведенных размерах ячеек и расстоянии  $l = 1,5$  м до ОИ оптимальное значение  $h$  находится в пределах 500 ... 600 мм, при расстоянии  $l = 2$  м – 400 ... 500 мм. Дальнейшее увеличение  $h$  не приводит к существенному снижению падающего на ОИ от излучающих элементов ИСИ теплового потока (рис. 3, а), но при этом приводит к снижению фактора видимости окружающей среды – криозэкранов термовакуумной камеры (рис. 3, б).

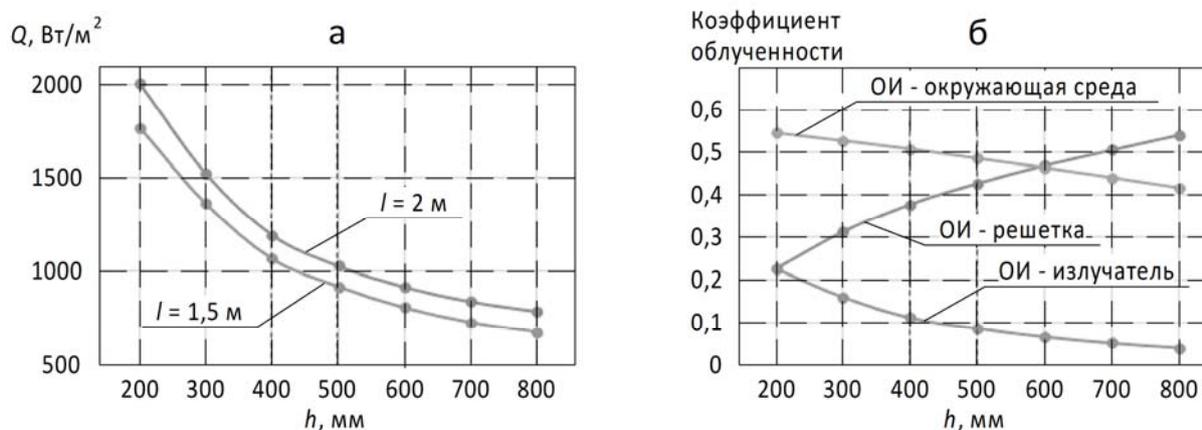


Рис. 3. Зависимость теплового потока, падающего на ОИ от излучателей и решетки, от глубины ячеек решетки  $h$ :  
 а – тепловой поток, падающий на ОИ от излучателей и решетки;  
 б – коэффициенты облученности ОИ с окружающими элементами ( $l = 2$  м)

Предпочтительным является максимально возможное, на расстояние  $l = 2$  м, удаление ОИ от излучателя ИСИ.

Предложенный авторами способ защищен патентом РФ 2801979 [3].

### Библиографические ссылки

1. Двирный Г.В., Шевчук А.А., Двирный В.В [и др.]. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.
2. Шевчук А.А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.
3. Пат. 2801979 Российская Федерация, МПК7 В64G 7/00. Способ моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов в термовакуумной камере / О.В. Пастушенко, А.А. Шевчук, В.В. Двирный ; заявитель и патентообладатель акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева». – № 2023104414 ; заявл. 28.02.23 ; опубл. 13.07.23, бюлл. № 20.

### References

1. Dvirnyy G. V., Shevchuk A. A., Dvirnyy V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G. *Analiz vozmozhnosti sozdaniya imitatora solnechnogo izlucheniya na osnove svetodiodnykh istochnikov dlya nazemnoy otrabotki kosmicheskikh apparatov* [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing applications]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, vol. 19, no. 2, p. 271–280 (In Russ).
2. Shevchuk A. A. [Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*. 2021, vol. 22, no. 4, p. 672–686 (In Russ).
3. Pastushenko O. V., Shevchuk A. A., Dvirnyy V. V. *Sposob modelirovaniya usloviy vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov v termovakuumnoy kamere* [Method for simulating the conditions of external heat exchange of spacecraft in a thermal vacuum chamber]. Patent RF, no. 2801979, 2023.



**Секция**

**«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
И УПРАВЛЕНИЕ»**

УДК 330.322

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМАЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ НАУЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ\*

Д. Д. Великанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: danvelikanov@mail.ru

*Использование наноспутников типа CubeSat в групповых полетах в последнее время стало одной из основных тем, представляющих интерес в космической отрасли. Формация наноспутников предлагает бюджетную и гибкую систему сбора научных данных на орбите Земли.*

*Ключевые слова: формация, малый космический аппарат, CubeSat.*

## POSSIBILITY OF USING THE FORMATION OF SMALL SPACECRAFT FOR SCIENTIFIC EXPERIMENTS

D. D. Velikanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: danvelikanov@mail.ru

The use of CubeSat-type nanosatellites in group missions has recently become a major topic of interest in the space industry. The nanosatellite formation offers a lowcost and flexible system for collecting scientific data in Earth orbit.

*Keywords: formation flying, small spacecraft, CubeSat.*

Важным достоинством формации, недоступным для одиночного спутника, является возможность одновременного проведения наблюдений, измерений, других экспериментов в различных точках пространства при заданном и контролируемом взаимном положении спутников. Это свойство особенно важно для метеорологии, задач изучения ионосферы, магнитосферы Земли, гравитационного поля или, к примеру, получения стереоизображений рельефа местности, а также снимков поверхности с большим разрешением, чем в случае использования одиночного спутника, когда разрешение снимка определяется максимальными поперечными размерами аппарата [1].

Стоит выделить несколько типов миссий с применением формации наноспутников:

1. Научные миссии по изучению Земли;
2. Миссии в области астрономии и астрофизики;
3. Миссии по демонстрации технологий;
4. Научные миссии по изучению планет и малых тел Солнечной системы [2]

### *1. Научные миссии по изучению Земли*

Общей целью миссий в области наук о Земле является развитие системы знаний о Земле и ее реакции на природные и антропогенные изменения для улучшения методов прогнозирования погоды, климата и опасных природных явлений.

### **Dynamic Ionosphere CubeSat Experiment (DICE)**

DICE – это совместная миссия нескольких университетов под руководством Университета штата Юта и при поддержке NSF и программы NASA. В рамках программы ELaNa были запущены два

---

\* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) 14-ой очереди. Проект «Космическая миссия ReshUCube-3», договор № 126С2/МОЛ/84929 от 31.03.2023.

идентичных CubeSat 1.5U на эллиптическую НОО. Каждый спутник несет по два зонда Ленгмюра для измерения параметров ионосферы.

#### **Flock-1**

Группировка Flock-1, разработанная компанией Planet Labs Inc., состоит из двадцати восьми CubeSat 3U, которые будут обеспечивать получение изображений Земли с разрешением 3-5 м для экологических, гуманитарных и коммерческих проектов.

Другие миссии в данной области: RocketCube, FalconSAT-2, Charybdis, OPAL, Drag-free CubeSat, Fourier Transform Spectrometer (FTS) CubeSat, QB50.

#### *2. Миссии в области астрономии и астрофизики*

Целью астрономических и астрофизических миссий является изучение

Миссии, связанные в которых используются или предполагается использовать два или более малых космических аппарата.

#### **Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST)**

Цель проекта AAReST – продемонстрировать автономную сборку и реконфигурацию космического телескопа с распределенной апертурой путем сближения и отдаления формации двух наноспутников 3U относительно центрального наноспутника формата 9U. На центральном наноспутнике размещены два неподвижных зеркала, а на двух CubeSat 3U по одному адаптивному зеркалу с электроприводом

Другие миссии в данной области: OLFAR, SULFRO.

#### *3. Миссии по демонстрации технологий*

Миссии направлены на демонстрацию применения новейших технологий в космосе.

#### **High-speed, Multispectral, Adaptive Resolution Stereographic CubeSat Imaging Constellation (HiMARC)**

Концепция миссии HiMARC, возглавляемой Стэнфордским университетом, предусматривает запуск четырех оптических телескопов с виртуальной апертурой формата CubeSat 3U для получения многоспектральных стереографических изображений высокого разрешения наземных, лунных и астрономических объектов.

#### **AeroCube-4**

Три спутника AeroCube-4 формата 1U были построены компанией Aerospace Corporation. Каждый из спутников может определять свое положение с точностью до 20 м с помощью GPS-приемника. Спутники продемонстрировали управляемый полет в формации за счет изменением площади своего поперечного сечения с помощью выдвижных солнечных батарей.

Другие миссии в данной области: Canadian Advanced Nanospace eXperiment-4&5 (CanX-4&5), Humanitarian Satellite Constellation (HumSat).

#### *4. Научные миссии по изучению планет и малых тел Солнечной системы*

Целью планетарных исследований является изучение планет и малых тел Солнечной системы, а также изучение происхождения жизни.

#### **CubeSat Constellation at Mars**

Цель данной миссии заключается в запуске на орбиту Марса группировки из шестидесяти спутников типа CubeSat для изучения географического распределения и интенсивности электромагнитной активности на Марсе. Предполагается, что измерительные приборы будут на много порядков чувствительнее земных благодаря более низкой опорной орбите Марса.

Другие миссии в данной области: Artemis, Interplanetary Radio Occultation CubeSat Constellation (iROCC) [3].

Большинство из вышеперечисленных космических миссий с использованием наноспутниковой группировки направлены на изучение земли и околоземного пространства, а также демонстрацию новых технологий. Общей чертой данных миссий является полет в формации, при котором происходит автономная навигация отдельного аппарата в составе группы и управление их взаимным относительным положением. Для научных задач полет в формации дает возможность одновременного измерения характеристик среды в различных, но близких точках пространства. С технической стороны миссии объединяет наличие технологии межспутниковой коммуникации для реализации принципа распределенной информационной системы, а также возможность управления каждым отдельным наноспутником в группе (управление двигательной установкой, аэродинамическое управление).

В миссии ReshUCube-3 будет реализован метод аэродинамического управления формацией с использованием экспериментальной активной магнитной системой ориентации (AMCO). Использо-

ние данной системы ориентации позволит увеличить объем научной аппаратуры в полезной нагрузке наноспутников за счет более компактного размера АМСО по сравнению с системами ориентации, использующими двигательные установки.

Набор научных инструментов наноспутников миссии ReshUCube-3 в совокупности с управляемым формационным полетом позволит проводить эксперименты по распознаванию мелкомасштабных (<200 км) структур ионосферной плазмы и геомагнитного поля. Установка фотоаппаратуры на аппараты ReshUCube-3 позволит производить стереоснимки земной поверхности или снимки одной и той же местности с временным сдвигом в зависимости от конфигурации формации наноспутников.

#### **Заключение**

Использование формаций малых космических аппаратов является актуальным направлением космических исследований, позволяющим опробовать новые приборы и технологии, при этом многократно сократив расходы на проектирование, за счет уже готовой платформы CubeSat.

Разрабатываемые лабораторией НПЛ МКА технологии, такие как межспутниковая коммуникация и аэродинамическое управление формацией в рамках миссии ReshUCube-3, позволят вывести изучение околоземного пространства на новый качественный уровень.

#### **Библиографические ссылки**

1. Electronic textbook cosmos-journal.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://cosmos-journal.ru/articles/942> (дата обращения: 13.09.2023).
2. Saptarshi B., Rebecca F., Giri P. Subramanian, Soon-Jo C. Review of Formation Flying and Constellation Missions Using Nanosatellites. *Researchgate*. 2016, p. 2-13.
3. Saptarshi B., Giri P. Subramanian, Rebecca F., Daniel M., Soon-Jo C. A Review of Impending Small Satellite Formation Flying Missions. *Researchgate*. 2015, p. 1-18.

#### **References**

1. Electronic textbook cosmos-journal.ru. Available at: <https://cosmos-journal.ru/articles/942> (accessed 13.09.2023).
2. Saptarshi B., Rebecca F., Giri P. Subramanian, Soon-Jo C. Review of Formation Flying and Constellation Missions Using Nanosatellites. *Researchgate*. 2016, p. 2-13.
3. Saptarshi B., Giri P. Subramanian, Rebecca F., Daniel M., Soon-Jo C. A Review of Impending Small Satellite Formation Flying Missions. *Researchgate*. 2015, p. 1-18.

© Великанов Д. Д., 2023

УДК 621.382

## ОБ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. М. Кадочников \*, А. В. Кададова, В. В. Уткин

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская улица, 1  
\*E-mail: i49116@voenmeh.ru

*В статье рассматривается архитектура, принципы работы и ключевые характеристики оптического модуля связи для малого космического аппарата. Акцентируется внимание на перспективе применения оптической связи для расширения возможностей малых космических аппаратов. Рассмотрены вопросы разработки, преимущества и недостатки передачи данных с помощью оптической связи.*

*Ключевые слова: cubesat, оптическая связь, система связи, космический аппарат.*

## OPTICAL COMMUNICATION FOR SMALL SPACECRAFT

D. M. Kadochnikov \*, A. V. Kadadova, V. V. Utkin

D. F. Ustinov Baltic State Technical University "VOENMEH".  
1, 1st Krasnoarmeyskaya str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation  
\*E-mail: i49116@voenmeh.ru

*The paper discusses the architecture, operating principles and key characteristics of an optical communication module for a small spacecraft. It emphasizes on the prospect of using optical communications to expand the capabilities of small spacecraft. Development issues, advantages and disadvantages of data transmission by means of optical communication are considered.*

*Keywords: cubesat, optical communication, communication system, spacecraft.*

С развитием космонавтики возникла потребность в миниатюризации спутниковых систем, что привело к созданию формата cubesat. Малые космические аппараты (МКА) быстро завоевали свою нишу благодаря возможности осуществления научных исследований, образовательных проектов и коммерческих миссий с существенно меньшими затратами. Современные научные приборы генерируют большие объемы данных и требуют решений по ее передаче, как в направлении Космос-Космос, так и Космос-Земля.[1]

К современным примерам модулей оптической связи для МКА можно отнести CubeSat Laser Communication Transmitter (англ. Лазерный передатчик для CubeSat. Этот модуль предназначен передачи данных на скорости до 100 Мбит/с при расстоянии между КА и наземной станцией в 1500 км.[2]

На рисунке 1 представлена структурная схема предлагаемой оптической системы связи:

1. Излучатель – преобразует электрические колебания в световые импульсы
2. Приемник – преобразует импульсы света в электрические колебания
3. Оптическая система – служит для фокусировки и наведения луча, обеспечивая его доставку к цели с минимальными потерями.
4. Система управления – контролирует процесс передачи данных.

Технически простейшей схемой цифровой модуляции является амплитудно-сдвиговая модуляция (2ASK или ООК). ООК(On-Off Keying) – это схема манипуляции интенсивности, в которой источник света (несущая) включается для передачи логической "единицы" и выключается для передачи "нуля". Существенным недостатком такого вида модуляции является высокая вероятность срыва синхронизации при передаче длинных последовательностей "1" и "0". Для компенсации этого эффекта приме-

няют скремблирование (bit-stuffing) или иную систему кодирования, например, манчестерское кодирование, которое заключается в изменении состояния в начале или середине тактовых циклов.

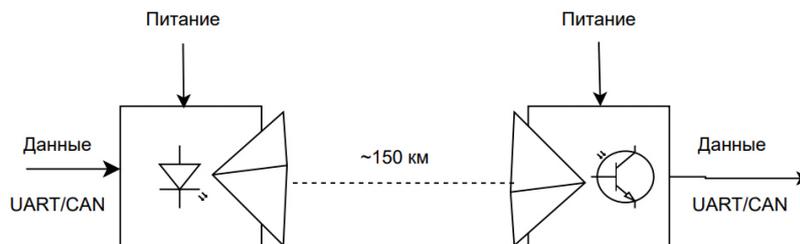


Рис. 1. Структурная схема системы оптической связи

Ниже приведен расчет оптической линии для орбитальной группировки малых спутников формата cubesat от 2U учитывая, что мощность излучателя ( $P_{tx}$ ) 1000 мВт, минимальной мощности на входе приемника ( $P_{rx}$ ) -31 дБм или  $8.89e-7$  Вт для скорости 155 Мбит/с, апертуре приемника 100 мм, длине волны 660 нм и расхождении луча в 1 мрад или  $0.0573^\circ$  по формулам для оптической линии в свободном пространстве.

$$P_{rx} = P_{tx} * \left(\frac{32}{\Xi^2}\right) * \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 * \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$$

Подставим числовые значения и проведем расчеты

$$8.89e-7 = 1 * \left(\frac{32}{0,001^2}\right) * \left(\frac{660 * 10^{-9}}{4\pi L}\right)^2 * \left(\frac{\pi * 0.1}{660 * 10^{-9}}\right)^2$$

По результатам расчетов дальность составила 149840м ~ 150 км

Использование оптической связи требует точного наведения друг на друга источников и приемников излучения.

Это возможно сделать тремя способами. Управлением ориентацией всего космического аппарата (КА), установкой оптического устройства на электромеханический подвес или отклонением луча без перемещения КА или передатчика. Управление ориентацией КА электромеханическим способом затрачивает большие объемы ценной энергии. Установка малогабаритных приемников и излучателей на подвесы позволит снизить затраты энергии на наведение по сравнению с изменением ориентации всего КА. Одним из методов управления лучом является применение гальво-сканеров. Они могут быстро сканировать или перемещать луч без физического перемещения всего прибора. К преимуществам этого метода можно отнести сниженные энергетические затраты и высокую скорость реакции системы.

В условиях космического пространства, где аппаратура будет испытывает постоянные изменения температур в зависимости от освещенности орбиты немаловажным является вопрос обеспечения требуемого уровня надежности электромеханической системы.

В таблице 1 проведено сравнение различных видов связи для МКА и возможных скоростей передачи данных на линии Космос-Земля.

Среди рассмотренных вариантов наибольшей пропускной способностью обладает оптическая связь. Однако нельзя забывать, что такие скорости справедливы для близких к идеальным условиям распространения и сильно зависят от технических возможностей наземной станции, а в случае применения оптической связи или высокоскоростных методов модуляции в X диапазоне от погодных условий.

На линии Космос-Космос оптическая связь обладает неоспоримыми преимуществами, поскольку размещение на борту МКА больших антенных комплексов не представляется возможным. Оптиче-

ская аппаратура связи позволяет отказаться от крупногабаритных развертываемых антенн, а также защитить информацию от утечек путем использования узких лучей.[3]

Таблица 1

**Сравнение скоростей передачи данных при помощи различных видов связи**

Вид связи	Диапазон возможных скоростей передачи данных, Мбит/с
Радио (диапазоне УКВ)	0.002-0.019
Радио (диапазон S)	0.064-10
Радио (диапазон X)	10-200
Оптическая	100-500

Оптические системы связи обеспечивают не только высокую скорость передачи данных, но и высокую степень защиты от радиочастотных помех, которые могут возникать в космосе. Благодаря этому, МКА формата cubesat могут обмениваться большими объемами данных на высокой скорости, что позволит создавать созвездия из таких аппаратов и решать задачи, которые ранее могли быть возможными с применением больших КА.

**Библиографические ссылки**

1. Nanosats Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nanosats.eu>, свободный (дата обращения: 07.09.2023).
2. L. Li, X. J. Zhang, J. H. Zhang, et al., "Advanced space laser communication technology on cubesats," ZTE Communications, vol. 18, no. 4, pp. 45–54, Dec. 2020. doi: 10.12142/ZTECOM.202004007.
3. M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications [Invited]," Journal of Optical Networking, Vol. 4, pp. 300–311, 2005, Режим доступа: <http://www.osa-jon.org/abstract.cfm?URI=JON-4-6-300>. свободный (дата обращения: 9.09.2023).

**References**

1. Nanosats Database [Electronic resource]. – <https://www.nanosats.eu>, free (access: 07.09.2023).
2. L. Li, X. J. Zhang, J. H. Zhang, et al., "Advanced space laser communication technology on cubesats," ZTE Communications, vol. 18, no. 4, pp. 45–54, Dec. 2020. doi: 10.12142/ZTECOM.202004007.
3. M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications [Invited]," Journal of Optical Networking, Vol. 4, pp. 300–311, 2005, <http://www.osa-jon.org/abstract.cfm?URI=JON-4-6-300>.

© Кадочников Д. М., Кададова, А. В., Уткин В. В., 2023

УДК 629.78

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ФОРМ-ФАКТОРА CUBESAT ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАЛЬНЕГО КОСМОСА

Т. Ш. Комбаев<sup>1</sup>, М. Е. Артемов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал АО «НПО Лавочкина»

Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Октябрьская, 17

<sup>2</sup>АО «НПО Лавочкина»

Российская Федерация, 141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

E-mail: kombaew@ya.ru

*Современное развитие микроэлектроники и технологий создания космических аппаратов (КА) открывает возможность для создания новых инструментов и направлений научных исследований космического пространства. Одно из таких новых направлений – малые КА форм-фактора CubeSat для исследования дальнего космоса. В настоящее время существует множество как уже существующих миссий, так и проектов, анализируя которые, можно выявить несколько тенденций в развитии данного направления космических исследований.*

*Ключевые слова: CubeSat, космический аппарат, астероиды, Марс, Луна*

## DEVELOPMENT TRENDS OF CUBESAT SPACECRAFT FOR DEEP SPACE EXPLORATION

T. S. Kombaev<sup>1</sup>, M. E. Artemov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Affiliate of Lavochkin Association

17, Oktyabrskaya str., Kaluga, 248000, Russian Federation

<sup>2</sup>Lavochkin Association

24, Leningradskaya str., Moscow region, Khimki, 141002, Russian Federation

E-mail: kombaew@ya.ru

*The modern development of microelectronics and technologies for the creation of spacecraft opens up the possibility for the creation of new instruments and directions of scientific research of outer space. Currently, there are many completed missions and projects of such spacecraft. Analyzing these missions, it is possible to identify several trends in the development of this direction of space research.*

*Keywords: CubeSat, spacecraft, asteroids, Mars, Moon*

Современное развитие микроэлектроники и технологий создания КА открывает возможность для создания новых инструментов и направлений научных исследований космического пространства. Одно из таких новых направлений в последние десять лет меняет облик научных миссий, дополняя их новыми инструментами – малыми КА форм фактора CubeSat (кубсат) с научной полезной нагрузкой. Такие кубсаты возможно создавать сравнительно недорого небольшими научными коллективами. Кубсаты, как правило, выводятся попутно с основной миссией и далее выполняют свои научные задачи, либо дополняют задачи основной миссии. И если раньше нишей таких кубсатов была низкая околоземная орбита, то в данный момент для них ставятся научные задачи в дальнем космосе. Рассмотрим наиболее интересные из таких КА, классифицируя их по объекту исследования:

1) Астероиды:

Одной из интересных миссий, пуск которой намечен на 2024 год, является КА «Нега». Это миссия ESA по планетарной защите, её целями являются исследование двойного астероида (65803) «Дидим», в задачи миссии входит детальное измерение результатов испытания кинетического импактора миссии NASA «DART». В составе основного КА находятся два кубсата форм-фактора 6U массой каждо-

го около 12 кг. Один из них Asteroid Prospection Explorer [1] снабжен тремя научными инструментами: для спектральных измерений, изучения взаимодействия солнечного ветра с астероидами и магнитометром. Для проведения научных исследований кубсат совершит посадку на астероид. Второй кубсат Juventas [2] будет проводить радиолокацию астероидов с помощью разворачиваемой 1,5-метровой антенны, после проведения исследований также запланирована посадка на астероид.

Другая миссия ESA – кубсат форм-фактора 12U для исследования астероидов M-Argo [3] массой 22 кг, пуск запланирован на 2024-2025 года к околоземным астероидам. Особенностью кубсата является собственная электроракетная двигательная установка  $\mu$ RIT. На борту имеется несколько научных инструментов, одним из них является мультиспектральная камера и лазерный высотомер для построения трехмерной карты астероида. Этот кубсат является первым опытным образцом, который проложит путь к отправке флота недорогих малых КА (от 10 до 20 CubeSat одновременно) для разведки и обзора различных околоземных астероидов.

Также для исследования астероидов были созданы:

- два кубсата Janus каждый массой по 36 кг (компания Lockheed Martin) для попутного выведения с миссией NASA Psyche

- кубсат Near-Earth Asteroid Scout массой 14 кг (NASA) – солнечный парус, выведенный на отлетную траекторию с миссией Artemis-1 [4]

- кубсат LICIA Cube массой 14 кг – вспомогательный инструмент миссии DART, передал на Землю первые фотографии процесса столкновения зонда DART с астероидом Диморф в рамках отработки технологии планетарной защиты.

2) Луна:

В рамках создания лунной космической станции Gateway была проведена миссия кубсата CAPSTONE [5] форм-фактора 12U массой 25 кг, который на практике проверил устойчивость расчётной орбиты будущей станции. Особенность данного кубсата заключается в том, что перелет в окрестности Луны он осуществлял по многомесячной траектории баллистического захвата. Самый массовый пуск кубсатов на отлетную траекторию и в окрестности Луны был проведен в рамках миссии Artemis-1 [4]. На адаптере последней ступени ракеты-носителя были закреплены 10 кубсатов (масса каждого порядка 14 кг) с широким кругом как научных, так и технологических задач: Lunar IceCube, LunIR, OMOTENASHI, EQUULEUS, BioSentinel, CuSP, Team Miles, ArgoMoon, LunaH-Map, NEA Scout. Для дальнейших миссий в рамках лунной программы Artemis, NASA разрабатывает более крупный адаптер для размещения КА выводимых попутно. Также к Луне запускался кубсат NASA Lunar Flashlight, планируется к запуску LUMIO и VMMO для составления карт летучих веществ, минералогии и измерения радиационной нагрузки на орбите Луны, а также ICUBE-Q в качестве попутной полезной нагрузки китайской миссии «Чанъэ-6».

3) Марс:

Первыми кубсатами запущенными к Марсу в 2018 году попутным запуском были два Mars Cube One [6] форм-фактора 6U, массой по 13,5 кг. Они предназначались для тестирования новой системы связи малой массы и навигационных технологий. Кубсаты смогли обеспечить ретрансляцию связи в режиме реального времени, пока целевой спускаемый аппарат InSight совершал посадку на Марс. Также, к этому типу КА можно отнести и первый марсианский вертолет Ingenuity, как схожий по массе, принципам создания и запуска. Ingenuity имеет массу 1,8 кг и был доставлен на Марс попутно в качестве дополнительно полезной нагрузки вместе с основным марсоходом Perseverance. Дальнейшим развитием исследований Марса с использованием кубсатов является проект Phobos/Deimos Regolith Ion Sample Mission (PRISM) для исследования Фобоса и Деймоса.

Исходя из вышеизложенного, можно выявить несколько тенденций развития КА форм-фактора CubeSat для исследования дальнего космоса:

1) КА большой массы с большим набором научных инструментов снабжаются дополнительными научными инструментами, размещенными на автономных кубсатах;

2) При выведении на отлетные траектории используется доступный запас массы разгонного блока или ступеней ракеты-носителя для выведения дополнительных дешевых и быстро создаваемых исследовательских аппаратов форм-фактора кубсат.

3) Для массового исследования малых тел солнечной системы возможно создание большой серии кубсатов массой порядка 20 кг со своей электроракетной двигательной установкой.

4) Переход к расширению области научных исследований космического пространства с помощью множества малых дешевых КА (как пример – рой исследовательских вертолетов на Марсе).

### Библиографические ссылки

1. Jan-Erik Wahlund et al. Asteroid Prospection Explorer (APEX) Cubesat For the ESA Hera Mission, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, held 15-20 September 2019 in Geneva, Switzerland, id. EPSC-DPS2019-1287.
2. Hannah R. Goldberg et al. The Juventas CubeSat in Support of ESA's Hera Mission to the Asteroid Didymos, 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites.
3. Philipp Hager et al. Miniaturised Asteroid Remote Geophysical Observer (M-ARGO): A stand-alone deep space CubeSat system for low-cost science and exploration missions. IPPW Small Sat Short Course, Boulder, CO, USA, 10-th of June 2018.
4. Dawn M. McIntosh et al. The NASA Cubesat Missions Flying on Artemis-1, 34th Annual Small Satellite Conference.
5. Thomas Gardner et al. CAPSTONE: A CubeSat Pathfinder for the Lunar Gateway Ecosystem, 35th Annual Small Satellite Conference.
6. Sami Asmar and Steve Matousek. Mars Cube One (MarCO) Shifting the Paradigm in Relay Deep Space Operations, SpaceOps Conferences, 16-20 May 2016, Daejeon, Korea.

### References

1. Jan-Erik Wahlund et al. Asteroid Prospection Explorer (APEX) Cubesat For the ESA Hera Mission, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, held 15-20 September 2019 in Geneva, Switzerland, id. EPSC-DPS2019-1287.
2. Hannah R. Goldberg et al. The Juventas CubeSat in Support of ESA's Hera Mission to the Asteroid Didymos, 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites.
3. Philipp Hager et al. Miniaturised Asteroid Remote Geophysical Observer (M-ARGO): A stand-alone deep space CubeSat system for low-cost science and exploration missions. IPPW Small Sat Short Course, Boulder, CO, USA, 10-th of June 2018.
4. Dawn M. McIntosh et al. The NASA Cubesat Missions Flying on Artemis-1, 34th Annual Small Satellite Conference.
5. Thomas Gardner et al. CAPSTONE: A CubeSat Pathfinder for the Lunar Gateway Ecosystem, 35th Annual Small Satellite Conference.
6. Sami Asmar and Steve Matousek. Mars Cube One (MarCO) Shifting the Paradigm in Relay Deep Space Operations, SpaceOps Conferences, 16-20 May 2016, Daejeon, Korea.

© Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е., 2023

УДК 004.72

## СЕТЕВОЙ СТЕК В КОНЦЕПЦИИ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕЖСПУТНИКОВОЙ СЕТИ

Н. Д. Кустов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: kustovnd@sibsau.ru

*В работе показаны базовые функции сетевого стека, который может быть использован для организации низкоскоростной технологической межспутниковой сети. Особое внимание уделяется функции маршрутизации с использованием протокола RPL.*

*Ключевые слова: ReshUCube, CubeSat, LoRa, 802.15.4, 6LoWPAN, RPL.*

## NETWORK STACK IN THE LOW-SPEED TECHNOLOGICAL INTER-SATELLITE NETWORK CONCEPT

N. D. Kustov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: kustovnd@sibsau.ru

*The paper shows the basic functions of the network stack, which can be used to organize a low-speed technological inter-satellite network. Particular attention is paid to the routing function using the RPL protocol.*

*Keywords: ReshUCube, CubeSat, LoRa, 802.15.4, 6LoWPAN, RPL.*

Одним из приоритетных направлений развития миссий малых космических аппаратов (МКА) является организация межспутникового взаимодействия. На сегодняшний день такое взаимодействие внутри группировок реализуется преимущественно через наземные базовые станции. Однако более перспективным представляется непосредственное взаимодействие МКА друг с другом. В данной работе предлагается стек технологий, который потенциально позволит обеспечить поддержание архитектуры межспутниковой сети. Основной задачей такой сети является выполнение сервисных, технологических функций: обеспечение резервного канала связи; оперативное обслуживание МКА, не находящегося в прямой радиовидимости; диагностика МКА при нештатной работе; координирование действий группировки МКА и др.

Ранее был предложен стек ReshUCube, описывающий структуру сетевых протоколов и технологий, способную обеспечить, в теории, комплексную архитектуру интегрированной космической сети [1]. В данном же случае рассматривается более узкая область применения данного стека и ключевыми аспектами здесь являются: физическая среда передачи и обеспечивающая электронная компонентная база (ЭКБ); методы доступа к среде и поддержание физической топологии; обеспечение сетевых функций и маршрутизация. В сущности, представленные аспекты описаны тремя нижними уровнями модели OSI (Open Systems Interconnection).

Физический уровень стека представлен технологией LoRa (Long Range) [2]. Данная технология позволяет обеспечить пропускную способность (в зависимости от несущей частоты) до 62,5 Кбит/с или до 253,91 Кбит/с, что представляется достаточными значениями для обеспечения функционирования низкоскоростной технологической сети. Преимущества использования данной технологии: низкое энергопотребление; дальность передачи; полная толерантность к эффекту Доплера; низкая стоимость и компактность ЭКБ. В перспективе это позволит обеспечить массовое производство «де-

шевых» универсальных модулей, не предъявляющих особых требований к системе энергообеспечения и спутниковой платформе, способных обеспечить функционирование надежного канала связи большой дальности.

Канальный уровень обеспечивает драйвер, включающий функции стандарта IEEE 802.15.4 [3]. Ключевые особенности драйвера: фильтрация MAC-адресов; обеспечение подтверждения доставки кадров; механизмы множественного доступа ALOHA или CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) и т. д. При функционировании на одной частоте и с одинаковыми параметрами модуляции узлы будут находиться в общем домене коллизий. В таком случае описанные выше функции будут решающими с точки зрения обеспечения максимально возможной пропускной способности.

Сетевой уровень включает в себя несколько протоколов. Основным является протокол IETF 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks) [4]. Данный протокол является уровнем адаптации для IPv6 и обеспечивает некоторых важных функций сетевого уровня: сжатие сетевых заголовков, IPHC (IP-Compression-Protocol) и NHC (Next Header Compression); автоконфигурация сетевых адресов IPv6; протоколы ICMPv6 (Internet Control Message Protocol) и ND (Neighbor Discovery), позволяющий обнаруживать соседние узлы.

Помимо этого, ключевой особенностью является поддержка протокола маршрутизации RPL (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) [5], который позволяет конфигурировать все узлы сети как маршрутизаторы, которые поддерживают таблицу маршрутизации, хранят таблицу соседних узлов и, таким образом, реализуют топологию DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Каждый узел периодически проверяет, знает ли он корневой узел, в противном случае узел должен отправить широковещательное сообщение DIS. Каждый узел, который получает сообщение DIS, отправляет DIO. Перед отправкой сообщения DIO выполняется ожидание на случайный промежуток времени, чтобы избежать коллизий. Широковещательные DIO-сообщения отправляются периодически, они публикуют информацию о DODAG. Узел может попытаться восстановить сеть при возникновении проблем. Для этого он повторно инициализирует протокол маршрутизации с нуля. При этом увеличивается номер версии DODAG. Сообщения DIO содержат этот номер. Когда другой узел получает сообщение DIO с более высоким номером версии DODAG, он начинает выполнение процедуры `global_repair`, в которой удаляет все родительские узлы, устанавливает отправляющий узел в качестве предпочтительного родительского и планирует отправку сообщения DIO как можно скорее. Когда узел теряет все родительские или не имеет ни одного родительского в доступе, он выполняет процедуру `rpl_local_repair`. Эта процедура присваивает узлу бесконечный ранг, удаляет все родительские узлы и планирует отправку сообщения DIO как можно скорее. Общая схема маршрутизации в межспутниковой сети в терминологии RPL приведена на рисунке 1.

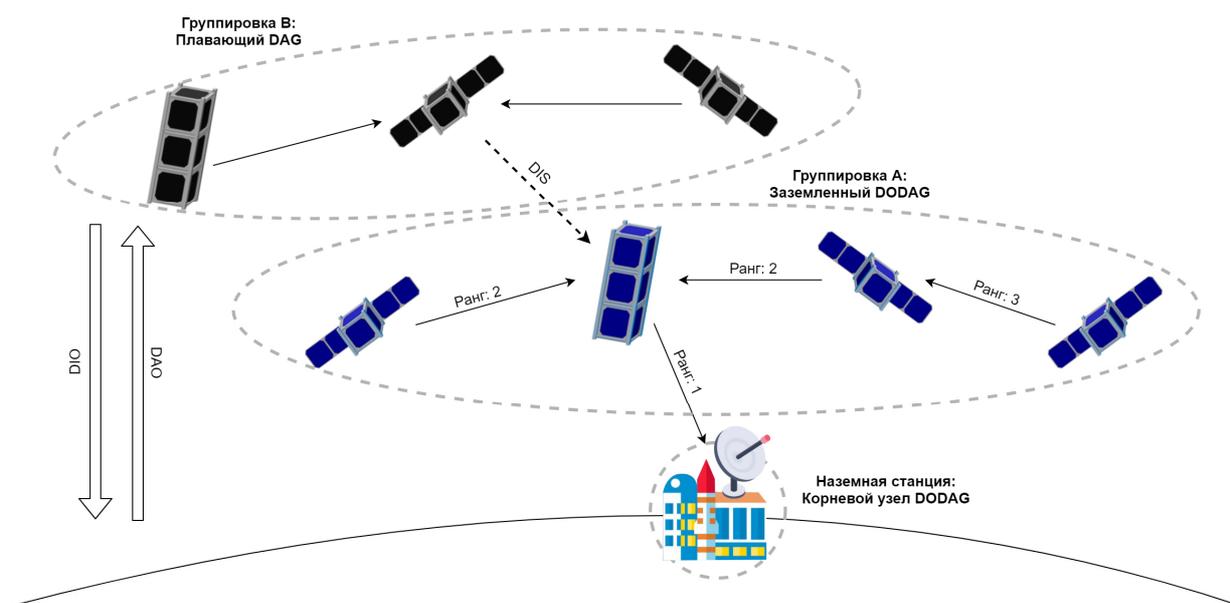


Рис. 1. Схема маршрутизации в межспутниковой сети

Таким образом, в результате работы были показаны функции сетевого стека, которые могут послужить основой низкоскоростной технологической межспутниковой сети. Данный сетевой стек является комбинацией технологий, которые уже показали свою эффективность в наземном сегменте.

В рамках космической миссии СибГУ им. М.Ф. Решетнёва ReshUCube-3 планируется апробация предложенной технологии в реальных условиях. Предполагается, что предложенные решения в дальнейшем могут быть приняты в качестве стандарта межспутникового взаимодействия.

### Библиографические ссылки

1. Кустов, Н. Д. Интегрированная космическая сеть: обоснование архитектурных и технических решений космической миссии ReshUCube-2 / Н. Д. Кустов, К. С. Евдокимов, А. В. Шахматов // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 260-272.
2. Semtech, AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Application Note [Электронный ресурс]. URL: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf> (дата обращения 05.08.2023).
3. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks in IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015), 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691.
4. Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J., and D. Culler. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, DOI 10.17487/RFC4944, September 2007 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4944> (дата обращения 03.08.2023).
5. Winter, T., Ed., Thubert, P., Ed., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vas-seur, JP., and R. Alexander. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks, RFC 6550, DOI 10.17487/RFC6550, March 2012 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6550> (дата обращения 03.08.2023).

### References

1. Kustov, N. D. Integrirovannaya kosmicheskaya set': obosnovanie arxitektury`x i texnicheskix reshenij kosmicheskoy missii ReshUCube-2 / N. D. Kustov, K. S. Evdokimov, A. V. Shaxmatov // Sibirskij ae`rokosmicheskij zhurnal. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 260-272 (In Russ).
2. Semtech, AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Application Note, Available at: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>.
3. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks in IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015), 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691.
4. Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J., and D. Culler. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, DOI 10.17487/RFC4944, September 2007, Available at: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4944>.
5. Winter, T., Ed., Thubert, P., Ed., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vas-seur, JP., and R. Alexander. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks, RFC 6550, DOI 10.17487/RFC6550, March 2012, Available at: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>.

© Кустов Н. Д., 2023

УДК 621.396.946.2, 621.396.2

## НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ РАДИОЛИНИИ S-ДИАПАЗОНА ДЛЯ RESHUCUBE-2

Е. Г. Лапухин\*, Д. А. Потугина, Т. Е. Лапухин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: lapukhineg@mail.sibsau.ru

*S-диапазон нисходящей радиолинии для ReshUCube-2 позволяет увеличить скорость потока данных со спутника. Рассмотрена реализация наземного сегмента для приема данных в Студенческом центре управления полетами СибГУ им. М. Ф. Решетнева.*

*Ключевые слова: радиолиния, s-диапазон, кубсат.*

## S-BAND GROUND SEGMENT FOR RESHUCUBE-2

E. G. Lapukhin\*, D. A. Potugina, T. E. Lapukhin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: lapukhineg@mail.sibsau.ru

*The S-band downlink for ReshUCube-2 will increased data rates from the satellite. Shown of the implementation of the ground segment of S-band downlink for receiving data at the Student mission control center of Reshetnev-University.*

*Keywords: radio, s-band, cubesat.*

Второй по счету кубсат Сибирского университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева формата 3U (ReshUCube-2) был выведен на солнечно-синхронную орбиту 27 июня 2023г. Штатная дуплексная связь с кубсатом в Студенческом центре управления полетами осуществляется в метровом (восходящая линия ~145 МГц) и дециметровом (нисходящая линия ~435 МГц) диапазонах. Первые сеансы связи были осуществлены уже на следующий день после запуска – 28 июня и получены данные телеметрии [1].

В наземном комплексе оборудования [2] в качестве штатного средства радиосвязи с космическим аппаратом используется VHF/UHF трансивер IC-910H, антенная система 145 и 435 МГц, усилитель AG-35, поворотное устройство Yaesu (G5500).

В бортовую конфигурацию оборудования спутника включен передатчик S-диапазона (2400МГц). Для увеличения скорости приема данных было решено реализовать наземный сегмент радиолинии S-диапазона.

Наземная часть разработанной радиолинии включает в себя прямофокусную параболическую антенну диаметром 2,1 м, петлевой облучатель, МШУ+МШУ, конвертер частоты, фидер и SDR-приемник.

Антенна установлена на поворотное устройство SpidAlfa [3], которое управляется через интерфейс программой-треккером «Orbitron».

За основу разработки петлевого облучателя был взят двухдиапазонный облучатель на длины волн 13 и 23 см [3]. Моделирование облучателя проводилось в CST Studio Suite [4]. Изготовленный облучатель имеет следующие характеристики на частоте 2400МГц: КСВ равен 1,2, волновое сопротивление составляет 43 Ом. Усиление сигнала на МШУ составляет 20 дБ и далее после конвертера частота понижается до 122 МГц. На SDR-приемник сигнал поступает по коаксиальной линии (PK50) для дальнейшего декодирования. В коаксиальных линиях для частоты 2400МГц используется кабель RG402.

В качестве конвертера частоты используется адаптированный под радиочастоту конвертер MMDS DVB-T/T2 с частотой гетеродина 2278МГц. Питание конвертера (12В) подается по коаксиальному кабелю. Питание МШУ (5 и 12 В) осуществляется через стабилизаторы напряжения по отдельной линии питания.

Таким образом, с помощью разработанной радиочастоты наземного сегмента S-диапазона планируется увеличить скорость приема информации с кубсата ReshUCube-2 и повысить эффективность его эксплуатации.

#### Библиографические ссылки

1. Первая телеметрия с ReshUCube-2 [Электронный ресурс]. URL: <https://sat.sibsau.ru/blog/1/post/reshucube-2-28> (дата обращения: 10.09.2023).
2. ДОКА-Н [Электронный ресурс]. URL: <https://sat.sibsau.ru/page/doca-n> (дата обращения: 10.09.2023).
3. Manuals Alfa RAEL Rotator [Электронный ресурс]. URL: [http://www.alfaradio.ca/docs/Rotators\\_Controllers/Manuals/Rotators/AlfaSpid\\_RAEL\\_12APR2022-qr.pdf](http://www.alfaradio.ca/docs/Rotators_Controllers/Manuals/Rotators/AlfaSpid_RAEL_12APR2022-qr.pdf) (дата обращения: 10.09.2023).
4. Galuscak R., Hazdra P. Dual-band Loop Feed with Enhanced Performance // Radioengineering, 2008. Vol. 17. PP. 33-37.
5. CST Studio Suite: electromagnetic field simulation software [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (дата обращения: 10.09.2023).

#### References

1. Pervaja telemetrija s ReshUCube-2 [First telemetry with ReshUCube-2]. Available at: <https://sat.sibsau.ru/blog/1/post/reshucube-2-28> (accessed 10.09.2023).
2. DOKA-N Available at: <https://sat.sibsau.ru/page/doca-n> (accessed 10.09.2023).
3. Alfa RAEL Rotator Available at: [http://www.alfaradio.ca/docs/Rotators\\_Controllers/Manuals/Rotators/AlfaSpid\\_RAEL\\_12APR2022-qr.pdf](http://www.alfaradio.ca/docs/Rotators_Controllers/Manuals/Rotators/AlfaSpid_RAEL_12APR2022-qr.pdf) (accessed 10.09.2023).
4. Galuscak R., Hazdra P. Dual-band Loop Feed with Enhanced Performance // Radioengineering, 2008. Vol. 17. PP. 33-37.
5. CST Studio Suite: electromagnetic field simulation software Available at: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (accessed 10.09.2023).

© Лапухин Е. Г., Потугина Д. А., Лапухин Т. Е., 2023

УДК 52-323.8

## БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА RESHUCUBE-2\*

М. М. Лукьянов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mishka.125555@mail.ru

*В данной работе описываются результаты прогнозирования орбитального движения наноспутника класса CubeSat в программе GMAT. Анализ темпов снижения орбиты позволяет оценить время существования данного космического аппарата на орбите.*

*Ключевые слова: CubeSat, аэродинамическое торможение, снижение орбиты, TLE, GMAT.*

## BALLISTIC FORECAST OF THE RESHUCUBE-2 SMALL SATELLITE

M. M. Lukyanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mishka.125555@mail.ru

*This paper describes the results of predicting the orbital motion of a CubeSat class nanosatellite in the GMAT program. The analysis of the rate of orbit decline makes it possible to estimate the lifetime of this satellite in orbit.*

*Keywords: CubeSat, aerodynamic braking, orbit decline, TLE, GMAT.*

**Введение.** Прогнозирование динамики орбитального движения искусственных спутников Земли (ИСЗ) является неотъемлемым элементом проектирования любой космической миссии. Возможности аналитических методов ограничиваются определением общего решения для задачи двух сферических тел, а также некоторых частных случаев задачи трех тел. Для учета эффекта отклонения орбиты, вызванных формой Земли, атмосферным сопротивлением, давлением солнечного излучения и гравитационными эффектами от других тел, применяются упрощенные модели возмущений [1]. Они представляют собой наборы линеаризованных эмпирических уравнений, удобные для программной реализации и быстрых вычислений. Численное интегрирование позволяет достичь большей точности при использовании реалистичных моделей силовых воздействий. Его основным недостатком является накопление ошибки в процессе последовательных расчетов.

**Влияние остаточной атмосферы на орбитальное движение КА.** Наиболее трудно предсказуемым фактором при моделировании движения спутника на низкой околоземной орбите является аэродинамическое воздействие атмосферы, и неточности его расчета вносят наибольший вклад в общую ошибку прогнозирования. Это обусловлено зависимостью плотности атмосферы от интенсивности потока солнечного излучения. При этом величина лобового сопротивления определяет темпы снижения орбиты КА.

**Рассмотрение динамики орбитального движения КА ReshUCube-2.** С помощью программного скрипта, реализованного с применением библиотеки Pyorbital в среде Python, проведен расчет орбитальных параметров наноспутника класса CubeSat ReshUCube-2 [2], начиная с момента запуска, с ша-

---

\* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) 6-ой очереди. Проект «Космическая миссия ReshUCube-3», договор № 126С2/МОЛ/84929 от 31.03.2023.

гом в 10 секунд. Координаты спутника определены согласно наборам элементов орбиты TLE (two-line element set), полученным с сайта [spacetrack.org](http://spacetrack.org) [3]. Для рассматриваемого периода времени приведен график высоты орбиты (рис. 1).

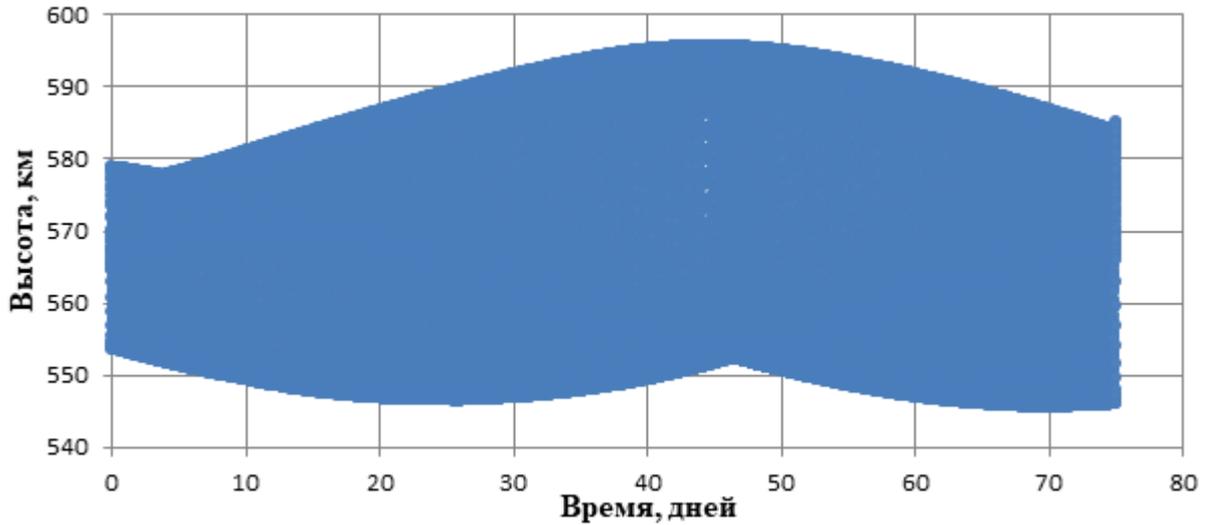


Рис. 1. Динамика изменения высоты ReshUCube-2 с 27.06.23 по 12.09.2023

Согласно полученным данным, аппарат был выведен на орбиту 553,6-578,9 км. За 75 дней орбита снизилась до диапазона 546,2-582,9 км. В среднем снижение за рассмотренный период времени составило 1,7 км.

На следующем этапе выполнено моделирование эволюции орбиты численным методом Рунге-Кутта 89 порядка с переменным шагом интегрирования 10 секунд с помощью программы GMAT [4]. Для инициализации расчетов использованы декартовы координаты положения спутника в момент выведения на орбиту, полученные согласно данным предварительного TLE. Для проверки соответствия результатов моделирования реальным темпам снижения орбиты построен график разности величин орбитальной высоты, полученных из TLE и из расчетов в GMAT (рис. 2).

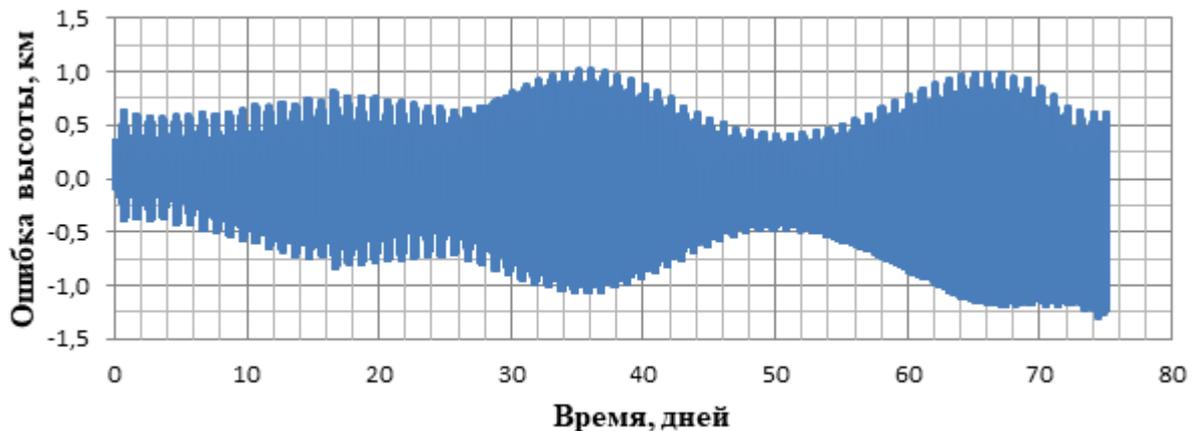


Рис. 2. Разность значений высоты ReshUCube-2 согласно TLE и согласно GMAT

Отличие программных расчетов высоты от данных, полученных из двухстрочного набора элементов орбиты, составляет не более 1,3 км за 75 суток.

Расчеты основаны на следующих моделях:

- гравитационная модель EGM-96 с учетом 10 старших сферических гармоник гравитационного потенциала Земли;

- модель атмосферы MSISE-90 [5] с использованием архивных индексов солнечной и геомагнитной активности, полученных с сайта celestrak.org [6];

- встроенная модель давления солнечного излучения.

Также заданы баллистические параметры спутника: масса: 3,45 кг; коэффициент аэродинамического сопротивления: 2,2; площадь мишени: 0,035 – принятое усредненное значение для свободно ориентированных аппаратов CubeSat, имеющих форм-фактор 3U.

**Заключение.** Учитывая, что погрешность определения орбитальной высоты по TLE составляет 1 км, можно утверждать, что результаты моделирования хорошо согласуются с реальным движением КА. На основании этого прогнозирование распространено до времени, когда спутник достигает плотных слоев атмосферы, и проведена оценка времени существования КА на орбите. Оно составило 11 лет.

### Библиографические ссылки

1. Paulet T. An Open-Source Solution for TLE based Orbit Determination / T. Paulet, B. Cazabonne // 8th European Conference on Space Debris, 2021. 9 p.

2. Кустов Н. Д. Интегрированная космическая сеть: обоснование архитектурных и технических решений космической миссии ReshUCube-2 / Н. Д. Кустов, К. С. Евдокимов, А. В. Шахматов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 260–272.

3. Space-Track.org [Электронный ресурс]. URL: <https://www.space-track.org/> (дата обращения: 05.09.2023).

4. General Mission Analysis Tool (GMAT) v.R2016a [Электронный ресурс]. URL: <https://software.nasa.gov/software/GSC-17177-1> (дата обращения: 03.09.2023).

5. Hedin A. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res., 1991. № 96. P. 1159–1172.

6. CelesTrak: EOP and Space Weather Data [Электронный ресурс]. URL: <https://celestrak.org/SpaceData/SW-Last5Years.txt> (дата обращения: 12.09.2023).

### References

1. Paulet T., Cazabonne B. An Open-Source Solution for TLE based Orbit Determination. 8th European Conference on Space Debris, 2021, 9 p.

2. Kustov N. D., Evdokimov K. S., Shahmatov A. V. *Integrirovannaya kosmicheskaya set': obosnovanie arkhitekturnykh i tekhnicheskikh resheniy kosmicheskoy missii ReshUCube-2* [Space integrated network: architectural and technical solutions justification of the ReshUCube-2 space mission]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, vol. 24, no. 2, p. 260-272. (In Russ.).

3. Space-Track.org. Available at: <https://www.space-track.org/> (дата обращения: 5.9.2023).

4. General Mission Analysis Tool (GMAT) v.R2016a. Available at: <https://software.nasa.gov/software/GSC-17177-1> (accessed 3.9.2023).

5. Hedin A. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, no 96, p. 1159–1172.

6. CelesTrak: EOP and Space Weather Data. Available at: <https://celestrak.org/SpaceData/SW-Last5Years.txt> (accessed 12.9.2023).

© Лукьянов М. М., 2023

УДК 531

## ДИНАМИКА УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ДИССИПАТИВНЫМ ДЕМПФЕРОМ

З. В. Морина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
E-mail: morina.z@yandex.ru

*В работе построена математическая модель движения спутника при действии магнитных и гравитационных моментов. Изученная схема поможет стабилизировать космический аппарат, благодаря возникающему диссипативному моменту.*

*Ключевые слова: космический аппарат, гравитационный демпфер, магнитный демпфер, математические модели, динамика, диссипативные метод, уравнения движения.*

## DYNAMICS OF ANGULAR MOTION OF SPACECRAFT WITH DISSIPATIVE DAMPER

Z. V. Morina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev  
34, Moskovskoe Shosse Street, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: morina.z@yandex.ru

*In this work, a mathematical model of satellite motion under the action of magnetic and gravitational moments is constructed. The studied model will help to stabilize the spacecraft due to the arising dissipative moment.*

*Keywords: spacecraft, gravity damper, magnetic damper, mathematical models, dynamics, dissipative method, equations of motion.*

**Введение.** Рассматривается задача управления ориентацией космического аппарата (КА). Задача предполагает гашение больших значений угловой скорости КА. Для гашения углового момента используют разные способы, в том числе применение магнитного и гравитационного демпфера. Поэтому исследование влияния демпферов на динамику углового движения КА, является актуальной задачей.

Целью исследования являлось моделирование динамики и синтез углового движения космического аппарата.

**Математическая модель и результаты моделирования.** Рассматривается орбитальное движение наноспутника по круговой орбите. Используются следующие системы координат (СК): 1. OXYZ – орбитальная СК; 2. Oxyz – центральная СК, связанная с основным телом и совпадающая с его главными осями инерции; 3. O<sub>x<sub>1</sub></sub>u<sub>1</sub>z<sub>1</sub> – центральная СК, связанная с главными осями тела-демпфера. В случае, когда демпфер находится в центральной части спутника, считаем, что орбитальная система и связанные с ней системы являются центральными, т.е. начало координат всех СК совпадает с центром масс спутника (рис. 1). [1]

В работе рассматривается действие гравитационного и магнитного демпферов, а также их совместное действие. Схемы устройства демпферов аналогичны [1], [2].

Для описания углового положения системы используются углы эйлерового типа в орбитальной СК. Для системы Oxyz использовали углы  $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$  последовательных поворотов в порядке  $x \rightarrow y \rightarrow z$ . Аналогично СК O<sub>x<sub>1</sub></sub>u<sub>1</sub>z<sub>1</sub> переведена с помощью углов  $\{\psi_1, \psi_2, \psi_3\}$  [3].

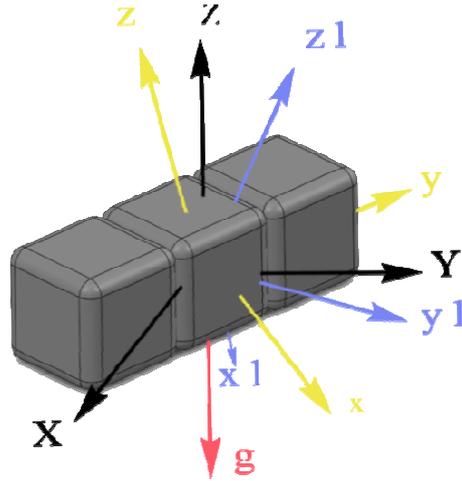


Рис. 1. Наноспутник с демпфером в центральном блоке и соответствующие СК

Получены неявные кинематические уравнения для компоненты угловой скорости основного тела  $\omega = [p, q, r]^T$  в проекции на связанную систему координат ху<sub>z</sub>:

$$\begin{cases} p = \dot{\theta}_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 + \dot{\theta}_2 \sin\theta_3 + \omega_0 \Theta_{12} \\ q = -\dot{\theta}_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 + \dot{\theta}_2 \cos\theta_3 + \omega_0 \Theta_{22} \\ r = \dot{\theta}_1 \sin\theta_2 + \dot{\theta}_3 + \omega_0 \Theta_{32} \end{cases}$$

где  $\omega_0$  – значение орбитальной угловой скорости.

Кинематические уравнения демпфера  $\omega' = [p', q', r']^T$  в проекциях на связанную систему координат  $x_1 y_1 z_1$  запишутся аналогично.

Данные кинематические уравнения подходят для случаев, когда действует только гравитационный демпфер, только магнитный демпфер и оба демпфера одновременно.

Изучен случай, когда тензор инерции основного тела спутника имеет в связанной системе  $Oxuz$  центральную общую диагональную форму  $J = \text{diag}(A, B, C)$ , а тензор инерции тела с демпфером  $J' = \text{diag}(A', B', C')$  в своей системе [4]. Справедливы динамические уравнения движения спутника на круговой орбите:

$$\begin{cases} A\dot{p} + (C - B)qr = 3\omega_0^2 (C - B)\Theta_{23}\Theta_{33} + M_x + M_{mx} \\ B\dot{q} + (A - C)pr = 3\omega_0^2 (A - C)\Theta_{33}\Theta_{13} + M_y + M_{my} \\ C\dot{r} + (B - A)pq = 3\omega_0^2 (B - A)\Theta_{13}\Theta_{23} + M_z + M_{mz} \end{cases}$$

где  $\{\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}\}$  – это компоненты матрицы перехода,  $M = [M_x, M_y, M_z]^T$  – момент, действующий на основное тело со стороны демпфера-тела из-за жидкостного трения между внешней и внутренней сферами демпфера,  $M_m = [M_{mx}, M_{my}, M_{mz}]^T$  – управляющий момент, который создается за счет взаимодействия собственного магнитного момента спутника с магнитным полем Земли.

Динамические уравнения Эйлера для тела-демпфера запишутся аналогично.

При этом для моделирования динамики движения спутника с гравитационным демпфером в динамических уравнениях собственные магнитные моменты равны нулю. А для моделирования случая с магнитным демпфером все члены с  $\omega_0$  равны 0.

**Выводы.** Проведено численное моделирование углового движения спутника с внутренним демпфером относительно орбитальной СК. В том числе моделировалась динамика только для гравитационного демпфера. Далее моделировался комплексный случай: к гравитационному демпферу добавился магнитный, то есть в динамические уравнения движения спутника добавился магнитный момент [5]. Результаты численного моделирования показывают работоспособность демпферов. Одновременное действие магнитного и гравитационного демпфера приводит к более быстрому гашению колебаний.

#### Библиографические ссылки

1. Davis L.K. Motion damper //U.S. Patent No. 3,399,317. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. – 1968.
2. Сарычев В. А. ДЕ Охотимский и его роль в создании систем пассивной ориентации спутников //Прикладная небесная механика и управление движением. – 2010. – С. 223.
3. Маркеев А. П. Теоретическая механика: учебник для университетов. – Издательство " Черо", 1999, С. 49-51.
4. Doroshin A. V. Gravitational dampers for unloading angular momentum of nanosatellites //Advances in Nonlinear Dynamics: Proceedings of the Second International Nonlinear Dynamics Conference (NODYCON 2021), Volume 1. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – С. 257-266.
5. Морозов В. М., Каленова В. И. Управление спутником при помощи магнитных моментов: управляемость и алгоритмы стабилизации //Космические исследования. – 2020. – Т. 58. – №. 3. – С. 199-207.

#### References

1. Davis L.K. [Motion damper] *U.S. Patent No. 3,399,317. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office*, 1968.
2. Sarychev V. A. [DE Okhotsimsky and his role in the development of passive orientation systems for satellites] *Applied celestial mechanics and motion control*, 2010, P. 223 (In Russ).
3. Markeev A. P. [Theoretical mechanics: textbook for universities] *Publishers " Cheraw"*, 1999, P. 49-51 (In Russ).
4. Doroshin A. V. [Gravitational dampers for unloading angular momentum of nanosatellites] *Advances in Nonlinear Dynamics: Proceedings of the Second International Nonlinear Dynamics Conference (NODYCON 2021), Volume 1. Cham : Springer International Publishing*, 2022, P. 257-266.
5. Morozov V.M., Kalenova V.I. [Satellite control using magnetic moments: Controllability and stabilization algorithms] *Cosm. Res. 58. №. 3*, 2020, P. 199-207 (In Russ).

© Морина З. В., 2023

УДК 629.78

## АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ ПЛАТФОРМ ФОРМАТА CUBESAT

П. С. Черников, Н. М. Хамидуллина\*, И. В. Зефилов

Акционерное общество «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»  
Российская Федерация, 141400, г. Химки, Московская область, улица Ленинградская, 24а

\*KHamidullinaNM@laspace.ru

*Доклад содержит результаты определения локальных поглощенных доз, а также частоты и числа (вероятности) случайных одиночных эффектов в интегральных микросхемах (ИМС) с различными уровнями стойкости к дозовым и одиночным эффектам, вызываемым ионизирующими излучениями космического пространства, для платформ различных форматов, функционирующих на орбитах, характерных для малых космических аппаратов (МКА) данного типа.*

*Ключевые слова: ионизирующее излучение космического пространства; локальная поглощенная доза; одиночные эффекты – сбои и отказы; интегральные микросхемы; космический аппарат.*

## ANALYSIS OF THE IMPACT OF SPACE IONIZING RADIATION ON INTEGRATED CIRCUITS OF CUBESAT FORMAT PLATFORMS

P. S. Chernikov, N. M. Khamidullina\*, I. V. Zefirov

Joint Stock Company "Lavochkin Association"  
24a, Leningradskaya str., Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation

\* KHamidullinaNM@laspace.ru

*This report contains the results of determining local absorbed dose as well as the frequency and number (probability) of random single event effects (SEE) in integrated circuits with different levels of hardness to dose and SEE caused by space ionizing radiation for CubeSat platforms of various format operating in orbits characteristic for this type spacecraft.*

*Keywords: space ionizing radiation; local absorbed doses; single event effects – upsets and failures; integrated circuits; integrated circuits; spacecraft.*

**Введение.** В последние годы разработка, изготовление и запуски микроспутников типового формата CubeSat носят все более массовый характер. Данный формат создания космических аппаратов успешно проявил себя как в сфере решения образовательных задач, так и натурной отработки новых технологических решений и получения летной квалификации приборов и устройств. Поскольку характерными для данного класса КА являются небольшие сроки активного существования (САС) и не самые проблемные с точки зрения космической радиации орбиты, то в большинстве случаев разработка ведется в условиях минимизации затрачиваемых на реализацию проекта средств, что зачастую приводит к использованию элементной базы с низким показателем стойкости к воздействию ИИ КП по дозовому ионизационному эффекту и низкими значениями сбое- и отказоустойчивости к воздействию высокоэнергетических протонов (ВЭП) и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), что характерно для сверхбольших интегральных схем (СБИС) коммерческого исполнения.

Доклад посвящен анализу дозовых и одиночных эффектов (сбоев и отказов) в ИМС при их функционировании в составе бортовой аппаратуры платформ CubeSat различных форматов (2U и 6U) при функционировании на типичных для этого класса МКА орбитах (низкая круговая орбита и опорная орбита при попутных запусках с межпланетными КА) и характерных САС [1].

За время функционирования бортовая аппаратура, устройства и конструкции МКА подвергаются воздействию: протонов и ионов солнечных космических лучей (СКЛ); протонов и ядер галактических космических лучей (ГКЛ); протонов и электронов радиационных поясов Земли (РПЗ). Под воздействием указанных факторов за счет изменения характеристик и свойств материалов, из которых изготовлена ИМС, возможна деградация характеристик самой ИМС, что может привести как к параметрическому, так и к функциональному дозовому отказу [2].

Кроме того, в чувствительных областях ИМС быстрые ионы и ядра создают достаточное количество неравновесных носителей заряда, которые могут инвертировать логическое состояние ячейки памяти, несущей один бит информации. Большинство изменений кодов в ячейках памяти восстанавливается программными способами и поэтому относятся к классу обратимых одиночных эффектов – одиночных сбоев (ОС). Реже воздействие ВЭП и ТЗЧ приводит к необратимым эффектам – одиночным отказам (ОО): «прожигу» мощных полевых транзисторов или потере функционирования ИМС, вызванной появлением паразитных связей, пробоем подзатворных диэлектрических слоев, тиристорным эффектом и др.

Расчёт величины локальной поглощенной дозы и частоты одиночных эффектов от потоков высокоэнергетических частиц в зависимости от толщины сферического экрана ведётся с применением лицензированного программного комплекса COSRAD, основанного на модели одиночных эффектов НИИЯФ МГУ [3-4]. В соответствии с ОСТ 134-1044-2007, для оценки вклада СКЛ принимается вероятность СКЛ 90%.

Расчеты с учетом пространственного расположения бортового оборудования в корпусе МКА производятся с помощью модифицированного программно-математического обеспечения «LocalDose&SEE» разработанного в АО «НПО Лавочкина» [5-6]. Задача решается методом секторирования с применением трехмерной модели КА.

По результатам оценки влияния ИИ КП на функционирование ИМС в составе КА сформулированы рекомендации по уровню стойкости ИМС в составе бортовой аппаратуры для различных сочетаний форм-факторов платформы CubeSat, орбиты его функционирования и срока существования.

### Библиографические ссылки

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 256 с.
2. Ионизирующие излучения и их воздействие на полупроводниковые материалы (по данным литературных источников). Часть 1 / О. Вовк, М. Марченко, В. Соколов // Современная электроника. 2022. №5. С. 59-64.
3. Кузнецов Н.В. Частота одиночных случайных эффектов в электронике на борту космических аппаратов // Космические исследования. 2005. Т. 43. № 6. С. 443 – 451.
4. Кузнецов Н.В., Малышкин Ю.М., Ныммик Р.А. и др. Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 2. С. 72-78.
5. Пичхадзе К.М., Хамидуллина Н.М., Зефилов И.В. Расчет локальных поглощенных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата // Космические исследования, 2006. Т. 44, № 2. С. 179-182.
6. Власенков Е.В., Зефилов И.В., Хамидуллина Н.М. Свидетельство о государственной регистрации программного комплекса “LocalDose&SEE” v.2. № 2022665130. 21.06.2022.

### References

1. *Ioniziruyushchiye izlucheniya kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeystviye na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Ionizing space radiation and their impact on the onboard equipment of spacecrafts] / under scientific. ed. doc. tech. sciences, prof. G.G. Raykunov. Moscow: FIZMATLIT, 2013. 256 p.
2. O. Vovk, M. Marchenko, V. Sokolov *Ioniziruyushchiye izlucheniya i ih vozdeystviya na poluprovodnikoviy materialy (po dannym literaturnih istochnikov). Chast 1* [Ionizing radiation and its impact on semiconductor materials (according to sources). Part 1]. *Sovremennaya elektronika*. 2022, no. 5, p. 59-64. (In Russ.)

3. Kuznetsov N.V. *Chastota odinochnykh sluchaynykh effektov v elektronike na bortu kosmicheskikh apparatov* [The frequency of single event effects in electronics on board spacecrafts]. *Kosmicheskiye issledovaniya*. 2005. V. 43. no. 6. P. 443 – 451. (In Russ.)
4. Kuznetsov N.V., Malyshkin Yu.M., Nymmik R.A. et al. [COSRAD software package for predicting radiation conditions on board spacecrafts]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki (VANT). Ser. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu*. 2011. Issue. 2. P. 72-78 (In Russ.).
5. Pichkhadze K.M., Khamidullina N.M., Zefirov I.V. *Raschet lokal'nykh pogloshchennykh doz s uchetom real'noy konfiguratsii kosmicheskogo apparata* [Calculation of local absorbed doses taking into account the actual configuration of the spacecraft]. *Kosmicheskiye issledovaniya*, 2006. T. 44, No. 2. P. 179-182. (In Russ.)
6. Vlasenkov E.V., Zefirov I.V., Khamidullina N.M. Certificate of state registration of the software package “LocalDose&SEE”v.2. № 2022665130. 21.06.2022.

© Черников П. С., Хамидуллина Н. М., Зефилов И. В., 2023

УДК 374.14

## ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПУТНИКА RESHUCUBE-1\*

О. Е. Шимова\*, Д. М. Зуев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: oksanaagafonova3@gmail.com

*В работе рассматриваются основные принципы организации процессов эксплуатации спутника ReshUCube-1 в университете Решетнёва.*

*Ключевые слова: космос, спутник, ReshUCube, телеметрия, эксплуатация.*

## ORGANIZATION OF OPERATION OF THE RESHUCUBE-1 SATELLITE

O. E. Shimova\*, D. M. Zuev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: oksanaagafonova3@gmail.com

*The publication discusses the basic principles of the organization of the processes of operation of the ReshUCube-1 satellite at Reshetnev University.*

*Keywords: space, satellite, ReshUCube, telemetry, operation.*

**Общие сведения о КА.** 9 августа 2023 года прошёл ровно год с запуска спутника ReshUCube-1. Космический аппарат (КА) имеет небольшие размеры (10x10x34 см) и относится к формату cubesat 3U. Миссией спутника является развёртывание концепции реконфигурируемой лаборатории с возможностью загрузки нового программного обеспечения (ПО) в процессе полёта [1].

Полезная нагрузка (ПН) для спутника была разработана научно-производственной лабораторией «Малые космические аппараты» (НПЛ «МКА») Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (СибГУ). Она имеет в своём составе различные научные приборы и датчики, позволяющие выполнять задачи космической лаборатории: наблюдение за земной поверхностью, мониторинг радиационной обстановки на орбите, технологические эксперименты, изучение атмосферы и магнитосферы Земли, стойкость электронных компонентов в космическом пространстве [2]. Служебная платформа ReshUCube-1 разработана компанией ООО «Спутник». Проект был реализован в рамках проекта «Space Pi» программы «Дежурный по планете» Фонда содействия инновациям [3-4].

**Структура управления.** В эксплуатации ReshUCube-1 задействованы две организации СибГУ им. М. Ф. Решетнёва: НПЛ «МКА» и Студенческий центр управления полётами (СЦУП) [5]. Лабораторию условно можно разделить на два отдела: отдел эксплуатации и инженерный отдел, где занимаются непосредственно разработкой технических средств.

Руководитель отдела эксплуатации НПЛ «МКА» определяет вектор работ с КА, руководитель полётов составляет и обрабатывает новые очереди команд, а также проводит обучение работе с КА для операторов.

---

\* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) 5-ой очереди. Проект «Космическая миссия ReshUCube», договор № 43С2/МОЛ/66974 от 13.04.2021.

Научная группа разрабатывает новые эксперименты, на основе которых создаются полётные задания. После проведения экспериментов сотрудники из научной группы проводят оценку и обработку полученных со спутника телеметрических данных.

Сеансы связи проводятся операторами СЦУПа. Предварительно все операторы проходят обучение и сдают зачёты на самостоятельное проведение сеансов связи, проведение экспериментов и регламентных работ.

**Планирование.** Первостепенной задачей руководителя полётов является составление расписания сеансов связи. Далее для каждого сеанса разрабатывается план в зависимости от текущих задач эксплуатации.

Все задачи можно поделить на несколько типов:

- срочные регламентные работы;
- регламентные работы по расписанию;
- обновление ПО и прошивки на КА;
- выполнение экспериментов и сбор научных данных.

В списке работы приводятся по градации от самых важных до второстепенных задач.

При определении плана сеанса необходимо учитывать следующие критерии:

- необходимость проведения регламентных работ (некоторые регламентные работы, например, гашение угловых скоростей, требуют незамедлительного проведения);
- наличие допусков оператора (если оператор не имеет допуска к какой-либо работе, и она не является безотлагательной, то в план сеанса эта работа не ставится);
- текущие задачи по экспериментам (запуск задачи сбора данных, получение научных данных с датчиков, создание и загрузка снимков);
- срочность задач (задачи, требующие безотлагательного исполнения, ставятся в приоритет).

Также в зависимости от текущего состояния КА, оператор вправе самостоятельно изменять план сеанса, в приоритете выполняя срочные задачи.

**Регламентные работы.** Перечень проводимых регламентных работ, направленных на поддержание работоспособности спутника ReshUCube-1, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень и назначение регламентных работ

Название работы	Частота проведения	Назначение
Сброс таймера Watch Dog	Два раза в сутки: в ночные и в утренние сеансы связи	Исключение зависания КА на длительное время
Обновление времени	Раз в два дня или при величине рассинхронизации более 2 сек	Повышение точности системы ориентации
Гашение угловых скоростей	При величине угловой скорости по любой из осей более 7 градусов/сек	Повышение точности системы ориентации, исключение потери связи с КА
Обновление TLE	Раз в 5 дней	Повышение точности системы ориентации

\*TLE – набор элементов, определяющих траекторию движения спутника по орбите

**Планы.** На момент написания публикации в инженерном отделе НПЛ «МКА» ведётся работа по разработке программного обеспечения для ПН, тестируются различные версии. Основной функционал текущей версии ПО состоит в возможности накопления различных научных данных о состоянии платформы, температуры и напряженности магнитного поля Земли на всём протяжении витка спутника по орбите, а не только над зоной прямой радиовидимости антенны.

В связи с новыми возможностями планируется полноценно вводить эксплуатацию ReshUCube-1 в учебную и научную деятельность университета. Первым этапом станет обучение преподавательского состава основам эксплуатации, аппаратному составу и научным возможностям спутника. Далее исходя из полученных знаний, преподавателям совместно со студентами в рамках итоговой проектной работы необходимо провести некоторые исследования в соответствии с научным направлением кафедры. Планируется, что во время исследований будет вестись прямое взаимодействие с НПЛ «МКА». Преподаватели и студенты составляют заказ на сбор некоторых научных данных в соответствии с методикой эксперимента, руководитель полётов составляет очередь команд и циклограмму,

внедряет в план-расписание сеансов связи. После сбора и выгрузки необходимых научных данных они передаются для проведения исследовательской деятельности.

**Итоги.** Научно-образовательный спутник ReshUCube-1 успешно эксплуатируется на орбите уже более года. За это время была выстроена эффективная структура процесса управления КА, включающая в себя несколько подразделений Университета. Планируется расширить эксплуатационную деятельность на весь Университет, включив в научную работу учебные кафедры.

#### **Библиографические ссылки**

1. Ханов В.Х., Зуев Д.М., Шахматов А.В. Реализации полезной нагрузки наноспутника ReshUCube-1 как реконфигурируемой космической лаборатории // Решетнёвские чтения, 2021, Т. 1, С. 418-419.
2. ReshUCube-1 Университета Решетнёва [Электронный ресурс]. URL: <https://reshucube.ru/> (дата обращения: 07.09.2023).
3. Созвездие школьных спутников [Электронный ресурс]. // Space-π. URL: <https://spacepi.space/> (дата обращения: 10.09.2023).
4. Дежурный по планете [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spacecontest.ru/> (дата обращения: 10.09.2023).
5. Студенческий центр управления полетами [Электронный ресурс]. // СибГУ им. М. Ф. Решетнёва. URL: <https://sat.sibsau.ru/> (дата обращения: 10.09.2023).

#### **References**

1. Khanov V. Kh., Zuev D.M., Shakhmatov A.V. Implementation of the payload of the ReshUCube nano-satellite as a reconfigurable space laboratory // Reshetnev Readings, 2021, Vol. 1, pp. 418-419.
2. ReshUCube-1 [Electronic resource]. URL: <https://reshucube.ru> (date of reference: 07.09.2023).
3. Constellation of school satellites [Electronic resource]. // Space-π. URL: <https://spacepi.space/> (accessed: 10.09.2023).
4. Duty officer on the planet [Electronic resource]. URL: <https://www.spacecontest.ru/> / (accessed: 10.09.2023).
5. Student Flight Control Center [Electronic resource]. // SibGU named after M. F. Reshetnev. URL: <https://sat.sibsau.ru/> / (accessed: 10.09.2023).



**Секция**

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

УДК 630.161

## ОЦЕНИВАНИЕ НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ ЮЖНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ SENTINEL-1 И PALSAR-2

И. А. Бабий

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: babii-igor@mail.ru

*На территорию Сибири по данным дистанционного зондирования Земли разработана и апробирована методика оценивания лесной надземной биомассы. При наличии удовлетворительных исходных данных методика позволяет получить карты биомассы с высоким разрешением.*

*Ключевые слова: биомасса, Сибирь, радиолокационная съёмка, Random Forest, регрессия.*

## ESTIMATION OF FOREST ABOVEGROUND BIOMASS IN SOUTHERN SIBERIA BASED ON SENTINEL-1 AND PALSAR-2 RADAR DATA

I. A. Babiy

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: babii-igor@mail.ru

*On the territory of Siberia, according to the data of remote sensing of the Earth, a technique for estimating the forest aboveground biomass was developed and tested. In the presence of satisfactory initial data, the technique makes it possible to obtain a high-resolution biomass map.*

*Keywords: на английском языке: biomass, Siberia, radar survey, Random Forest, regression.*

Система сбора данных инвентаризации лесов и таксации на территории России имеет ряд недостатков [1, 2]. Поэтому, локальные и региональные оценки биомассы на территории Сибири являются достаточно редкими, зачастую территория Сибири входит в различные глобальные оценки биомассы. Несмотря на это, леса Сибири являются значимыми для понимания углеродного баланса [3].

В результате проведенной работы разработана модель оценки лесной надземной биомассы, которая обладает следующими характеристиками: использует данные PALSAR-2 и Sentinel-1 A/B с высоким пространственным разрешением; карта высоты растительного покрова применяется для повышения точности оценки; карты растительного покрова отделяют лесную растительность от других типов земной поверхности; требует отбора данных дистанционного зондирования на основании погодных условий в даты съёмки для повышения точности оценки; использует временную серию снимков Sentinel-1 для уменьшения ошибок.

Модель основана на непараметрическом методе машинного обучения Random Forest [4] с подбором оптимальных гиперпараметров.

Ввиду отсутствия в открытом доступе удовлетворительных базовых значений биомассы наземных измерений, в качестве эталонных значений биомассы использована глобальная карта биомассы [5]. Однако, цель заключалась в проверке работоспособности модели, успешные результаты которой дают возможность использовать модель на основе более качественных эталонных данных.

Объектом исследования является юг Восточной Сибири, включая территории Красноярского края, Иркутской области и республики Хакасия и ограничена координатами: 54°00'00"N – 59°07'00"N северной широты и 91°00'00"E – 100°46'00"E восточной долготы.

На рисунке 1 показана созданная карта надземной биомассы с размером пикселей 100 метров в проекции WGS84. Карта была получена с использованием данных Sentinel-1B за 1-2, 13-14, 25-26 ав-

густа 2020 года обеих поляризаций, PALSAR-2 за 2020 год обеих поляризаций. Прогнозируемые результаты были выражены в т/га. Коэффициент детерминации варьируется в диапазоне 0,714-0,721, среднее значение равно 0,718. Среднеквадратическая ошибка в среднем получилась равной 46 т/га.

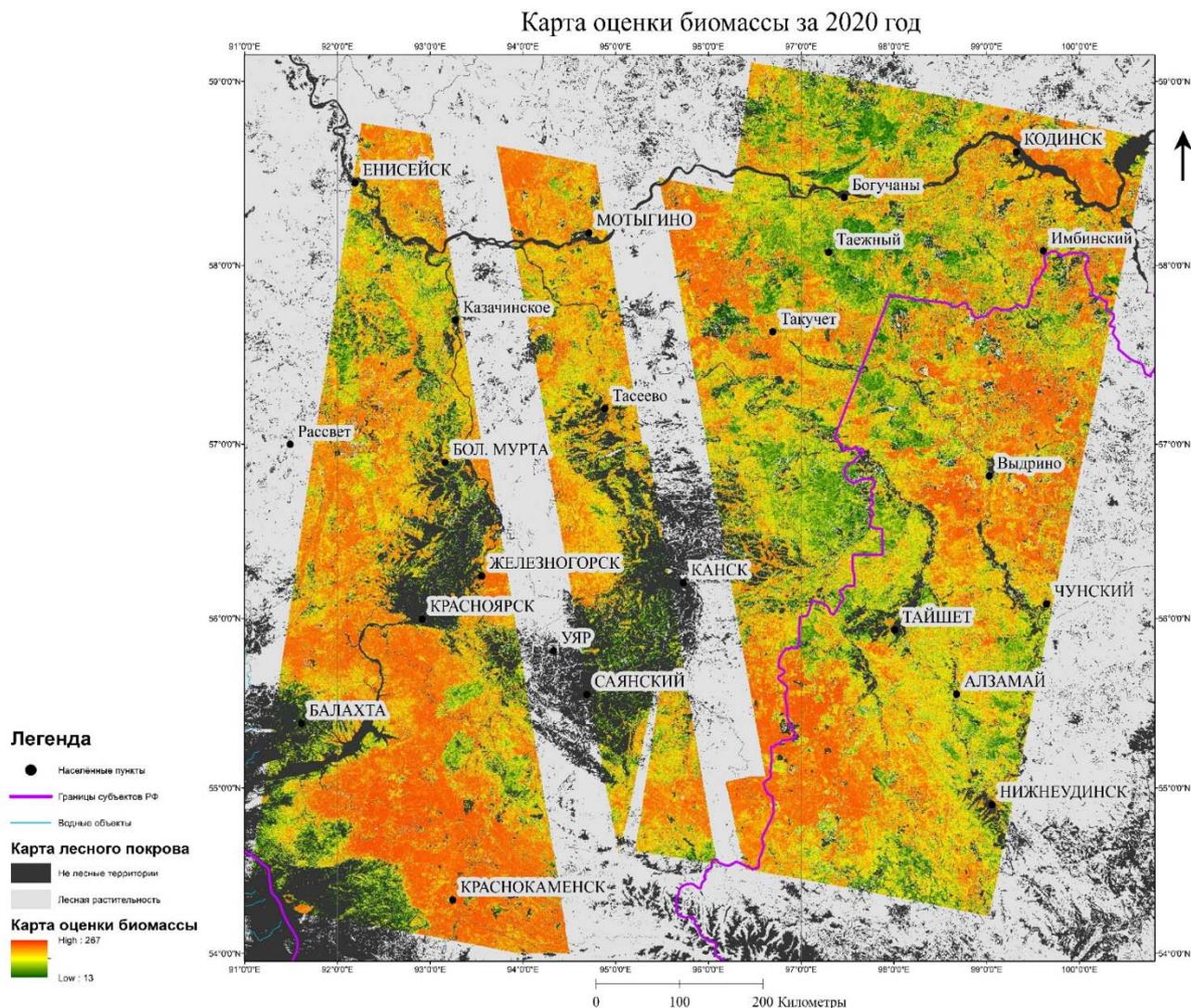


Рис. 1. Карта оценки надземной древесной биомассы (т/га) за 2020 год

Полученные результаты согласуются с результатами иных исследований [6]. Наблюдается завышение низких значений биомассы и занижение высоких, однако значения биомассы в диапазоне 170-220 т/га достаточно точны в сравнении с эталонной картой. Можно отметить, что данные С-диапазона в некоторой степени уменьшили завышение и недооценку. Завышение и недооценка были частично вызваны ансамблем (усреднением) деревьев регрессии, и частично эффектами насыщения датчика радаров с синтезированной апертурой в высоких диапазонах надземной живой биомассы (AGB) и эффектами влажности и шероховатости при низких значениях AGB.

Модель способна расширяться территориально и уточняться посредством накопления данных полевых измерений, выявлять происходящие изменения в зависимости от территории, выполнять поиск пространственных аномалий, мониторинг изменений растительного покрова из-за пожаров, повреждения шелкопрядом и иных факторов.

#### Библиографические ссылки

1. M. A. Stelmaszczuk-Górska, P. Rodriguez-Veiga, N. Ackermann, C. Thiel. Non-parametric retrieval of aboveground biomass in siberian boreal forests with ALOS PALSAR interferometric coherence and backscatter intensity // J. Imaging, 2016. Vol. 2(1). P. 1-21.

2. M. A. Stelmaszczuk–Górska, M. Urbazaev, C. Schmullius, et al. Estimation of above–ground biomass over boreal forests in Siberia using updated in situ, ALOS–2 PALSAR–2, and RADARSAT–2 data // *Remote Sensing*, 2018. Vol. 10. Article ID 1550.
3. *Global forest resources assessment 2020: Main report* // Rome, Italy: FAO, 2020. 184 p.
4. L. Breiman. *Random forests* // *Machine Learning*, 2001. Vol. 45. P. 5–32.
5. M. Santoro, O. Cartus. *ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass\_cci): Global datasets of forest above–ground biomass for the years 2010, 2017, 2018, 2019 and 2020, v4.* // NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2023. URL: <https://dx.doi.org/10.5285/af60720c1e404a9e9d2c145d2b2ead4e>.
6. I.A. Babiy, S.T. Im, V.I. Kharuk. *Estimating Aboveground Forest Biomass Using Radar Methods* // *Contemp. Probl. Ecol.*, 2022. Vol. 15 P. 433–448. URL: <https://doi.org/10.1134/S1995425522050031>.

### **References**

1. M. A. Stelmaszczuk–Górska, P. Rodriguez–Veiga, N. Ackermann, C. Thiel. *Non–parametric retrieval of aboveground biomass in siberian boreal forests with ALOS PALSAR interferometric coherence and backscatter intensity.* *J. Imaging*, 2016, vol. 2(1), p. 1–21.
2. M. A. Stelmaszczuk–Górska, M. Urbazaev, C. Schmullius, et al. Estimation of above–ground biomass over boreal forests in Siberia using updated in situ, ALOS–2 PALSAR–2, and RADARSAT–2 data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, article ID 1550.
3. *Global forest resources assessment 2020: Main report.* Rome, Italy: FAO, 2020, 184 p.
4. L. Breiman. *Random forests.* *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, P. 5–32.
5. M. Santoro, O. Cartus. *ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass\_cci): Global datasets of forest above–ground biomass for the years 2010, 2017, 2018, 2019 and 2020, v4.* NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2023, URL: <https://dx.doi.org/10.5285/af60720c1e404a9e9d2c145d2b2ead4e>.
6. I.A. Babiy, S.T. Im, V.I. Kharuk. *Estimating Aboveground Forest Biomass Using Radar Methods.* *Contemp. Probl. Ecol.*, 2022, vol. 15, p. 433–448, URL: <https://doi.org/10.1134/S1995425522050031>.

© Бабий И. А., 2023

УДК 519.7 + 004.93

## ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ О НЕЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

А. В. Бахтина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: anna-denisyuk@yandex.ru

*Рассматриваются результаты применения непараметрической методологии проверки гипотез о независимости случайных величин при анализе данных дистанционного зондирования антропогенных территорий.*

*Ключевые слова: проверка гипотезы о независимости случайных величин, распознавание образов, непараметрическая оценка плотности вероятности, антропогенные территории, дистанционное зондирование.*

## TESTING HYPOTHESES ABOUT THE INDEPENDENCE OF SPECTRAL FEATURES OF REMOTE SENSING DATA OF ANTHROPOGENIC TERRITORY

A. V. Bakhtina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: anna-denisyuk@yandex.ru

*The results of the application of a nonparametric methodology for testing hypotheses about the independence of random variables in the analysis of remote sensing data of anthropogenic territories are considered.*

*Keywords: testing the hypothesis of the independence of random variables, pattern recognition, non-parametric estimation of probability density, anthropogenic territories, remote sensing.*

Проверка гипотезы о независимости случайных величин является одним из основных этапов системного анализа спектральных данных дистанционного зондирования природных объектов. Традиционная методика проверки гипотезы о независимости случайных величин основана на использовании критерия Пирсона, которая содержит трудно формализуемый этап разбиения области значений случайных величин на многомерные интервалы [1]. В работах [2-4] предложена методика проверки гипотезы о независимости случайных величин, основанная на использовании непараметрического алгоритма распознавания образов ядерного типа. Её применение позволяет обойти проблему декомпозиции области значений случайных величин на интервалы. Методическую основу предлагаемого подхода составляют результаты исследований, представленные в работе [4].

В работе непараметрическая методика проверки гипотезы о независимости случайных величин применяется для обнаружения зависимостей между спектральными признаками данных дистанционного зондирования антропогенной территории.

Непараметрический алгоритм распознавания образов, соответствующий критерию максимального правдоподобия, основан на проверке соотношений между ядерными оценками плотностей вероятностей  $\bar{p}(x_1) \bar{p}(x_2)$  и  $\bar{p}(x_1, x_2)$ . Для ситуаций первого  $\Omega_1$  и второго  $\Omega_2$  классов, в которых справедливо соотношение  $\bar{p}(x_1) \bar{p}(x_2) > \bar{p}(x_1, x_2)$ , что подтверждает справедливость предположения о независимости случайных величин  $x_1, x_2$ . В области определения непараметрической оценки плотности вероятности  $\bar{p}(x_1, x_2)$  при выполнении соотношения  $\bar{p}(x_1) \bar{p}(x_2) < \bar{p}(x_1, x_2)$  следует зависимость случайных величин. Выполнение гипотезы  $H_0: p(x_1) p(x_2) \equiv p(x_1, x_2)$  определяет границу в области значений случайных величин  $x_1, x_2$ , разделяющей предположения о независимости либо зависимости

$x_1, x_2$ . На этой основе в работах [5-10] предложена непараметрическая методика проверки гипотезы о независимости случайных величин.

Объектом исследования является антропогенная территория в окрестностях г. Красноярск: карьер с координатами ( $55^{\circ}57' - 55^{\circ}58'$ ) северной широты,  $92^{\circ}54'$  восточной долготы на высоте 375 метров над уровнем моря (рис. 1).



Рис. 1. Фрагменты спутниковой съемки Sentinel-2.

Исходная информация формировалась по фрагментам съемки спутника Sentinel-2 за 26.08.2021 по девяти спектральным каналам:  $x_1$  (длина волны 458-523 нм),  $x_2$  (543-578 нм),  $x_3$  (650-680 нм),  $x_4$  (698-713 нм),  $x_5$  (733-748 нм),  $x_6$  (773-793 нм),  $x_7$  (785-899 нм),  $x_8$  (1565-1655 нм),  $x_9$  (2100-2280 нм).

Рассмотрим результаты применения разработанной методики проверки гипотезы о независимости случайных величин при анализе данных дистанционного зондирования территории карьера. По данным спутниковой съемки сформирована выборка  $V = (x_v^i, v = \overline{1, 9}, i = \overline{1, n})$  объемом  $n=3377$  (рис. 1).

Установлено, что сильной линейной зависимостью при оценке коэффициента корреляции  $\bar{r}(i, j) \geq 0,9$  обладают пары спектральных признаков:

$$\begin{aligned} &(x_8, x_9), (x_5, x_9), (x_4, x_9), (x_4, x_8), (x_5, x_8), (x_6, x_8), \\ &(x_2, x_7), (x_3, x_7), (x_5, x_7), (x_6, x_7), (x_4, x_6), (x_5, x_6), \\ &(x_4, x_5), (x_3, x_4), (x_2, x_3), (x_1, x_2). \end{aligned}$$

Предлагаемая методика проверки гипотезы о независимости случайных величин подтверждает наличие линейных зависимостей между 31 парами спектральных признаков при  $\bar{r}(i, j) \geq 0,8$ . Дополнительно определяют нелинейные зависимости между парами:

$$(x_1, x_9), (x_1, x_8), (x_1, x_7), (x_1, x_5), (x_1, x_4).$$

Полученные результаты анализа зависимостей между спектральными признаками территории карьера можно объяснить её относительной однородностью по сравнению с другими природными объектами. Имеются основания использовать показатели зависимости между спектральными признаками в качестве критерия обнаружения антропогенных территорий типа карьер по данным дистанционного зондирования.

### Библиографические ссылки

1. Пугачёв В. С. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. М.: Физматлит, 2002. 496 с.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ отношения средних квадратических отклонений ядерной оценки плотности вероятности в условиях независимых и зависимых случайных величин // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 9–14.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика проверки гипотез о распределениях многомерных спектральных данных с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // Компьютерная оптика. 2019. Т.43. №2. С. 238–244.

4. Лапко А. В., Лапко В. А. Проверка гипотезы о независимости двумерных случайных величин с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // *Автометрия*. 2021. Т. 57. № 2. С. 41–48.
5. Лапко А. В., Лапко В. А., Бахтина А. В. Формирование наборов независимых компонент многомерной случайной величины на основе непараметрического алгоритма распознавания образов // *Измерительная техника*. 2021. № 9. С. 3–9.
6. Лапко А.В., Лапко В.А., Бахтина А.В. Оптимизация ядерной оценки плотности вероятности двумерной случайной величины с независимыми составляющими // *Измерительная техника*. 2021. № 12. С. 17–21.
7. Методика последовательного формирования набора компонент многомерной случайной величины с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов / И.В. Зеньков, А.В. Лапко, В.А. Лапко, Е.В. Кирюшина, В.Н. Вокин, А.В. Бахтина // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45. № 6. С. 926-933.
8. Лапко А.В., Лапко В.А., Бахтина А.В. Применение непараметрического алгоритма распознавания образов в задаче проверки гипотезы о независимости переменных неоднозначных функций // *Измерительная техника*. 2022. № 1. С. 17–22.
9. Лапко А.В., Лапко В.А., Бахтина А.В. Сравнение методики проверки гипотезы о независимости двумерных случайных величин, основанной на непараметрическом классификаторе // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2022. №1. С. 45 – 56.
10. Лапко А.В., Лапко В.А., Бахтина А.В. Исследование методики проверки гипотезы о независимости двумерных случайных величин с использованием непараметрического классификатора // *Автометрия*. 2021. Т. 57. № 6. С. 90-100.

#### References

1. Pugachev V. S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 496 p. (In Russ.)
2. Lapko A. V., Lapko V. A. Analysis of the Ratio of the Standard Deviations of the Kernel Estimate of the Probability Density with Independent and Dependent Random Variables. *Measurement Techniques*. 2021, vol. 64, no. 3, p. 166–171.
3. Lapko A. V., Lapko V. A. A technique for testing hypotheses for distributions of multidimensional spectral data using a nonparametric pattern recognition algorithm. *Computer Optics*. 2019, vol. 43, no. 2, p. 238–244.
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Testing the Hypothesis of the Independence of Two-Dimensional Random Variables Using a Nonparametric Algorithm for Pattern Recognition. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2021, vol. 57, no. 2, p. 149–155.
5. Lapko A. V., Lapko V. A., Bakhtina A.V. Formation of Sets of Independent Components of a Multi-dimensional Random Variable Based on a Nonparametric Pattern Recognition Algorithm. *Measurement Techniques*. 2021, vol. 64, no. 9, p. 689 – 696.
6. Lapko A. V., Lapko V. A., Bakhtina A. V. Optimization of the kernel probability density estimation of a two-dimensional random variable with independent components. *Measurement Techniques*. 2022, vol. 64, no. 12, p. 958–962.
7. Zenkov I. V., Lapko A. V., Lapko V. A., Kiryushina E. V., Vokin V. N., Bakhtina A. V. A method of sequentially generating a set of components of a multidimensional random variable using a nonparametric pattern recognition algorithm. *Computer Optics*. 2021, vol. 45, no. 6, p. 926–933.
8. Lapko A. V., Lapko V. A., Bakhtina A. V. Application of a nonparametric pattern recognition algorithm to the problem of testing the hypothesis of the independence of variables of multi-valued functions. *Measurement Techniques*. 2022, vol. 65, no. 1, p. 17–23.
9. Lapko A. V., Lapko V. A., Bakhtina A. V. [Comparison of the methodology for hypothesis testing of the independence of two-dimensional random variables based on a nonparametric classifier]. *Scientific and technical information processing*. 2022, no. 1, p. 45 – 56. (In Russ.)
10. Lapko A. V., Lapko V. A., Bakhtina A. V. Study of the Method for Verification of the Hypothesis on Independence of Two-Dimensional Random Quantities Using a Nonparametric Classifier. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022, vol. 57, no. 6, p. 639–648.

УДК 556

## ПРОБЛЕМА ПРИВЯЗКИ СНИМКОВ ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА К СИСТЕМЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

А. Е. Гончаров, Е. А. Гончарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: goncharovae@sibsau.ru

*Гидролокатор бокового обзора широко используется для визуализации донной поверхности водоемов, генерируя при этом большой объем акустических изображений. Авторами рассматриваются ключевые проблемы, возникающие при привязке снимков гидролокатора бокового обзора к системе спутниковых координат.*

*Ключевые слова: гидролокатор бокового обзора, глобальные навигационные спутниковые системы, система координат, дистанционное зондирование.*

## SIDESCAN SONAR GNSS POSITIONING AND NAVIGATING: AN OVERVIEW

A. E. Goncharov, E. E. Goncharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ivanov@mail.ru

*Sidescan sonar is widely used by water researchers as an effective primary visualization tool and a vehicle for conducting search operations. During its operation, the sonar generates substantial amounts of raw and proceed data, particularly the usually recognizable sonar imagery. However, there does exist a serious issue in terms of accurately positioning these images using GNSS. In this paper, we shall do a brief overview on the nature of these problems and possible solutions.*

*Keywords: sidescan sonar, global satellite navigation and positioning systems, geographic coordinates, remote sensing.*

Особенности эксплуатации гидролокатора бокового обзора (ГБО) подробно изложены в [1–4]. Многолетний опыт работы с данным прибором показал низкую, зачастую условную точность позиционирования снимков ГБО и привязки ее к системе спутниковых координат через одну из глобальных навигационных систем (ГНСС). Поскольку радиосигналы, поступающие со спутника не могут проходить хоть какую-нибудь заметную толщину водной поверхности и транслироваться непосредственно на гидролокатор, то эти данные часто имеет условное значение. Использование буксируемого трансдюсера еще сильнее усугубляет данную проблему, поскольку в этом случае координаты даются судна, с которого осуществляется буксировка, а не буксируемого модуля, который находится на некотором удалении (рис. 1). В случае если известна длина вытравленного кабеля (портативные буксируемые гидролокаторы имеет длину кабеля от 25 до 150 м), можно пересчитать примерно, где находится обнаруженный объект. Однако, как показывает практика – этот способ не может считаться надежным: провести дополнительное обследование даже крупногабаритного объекта в условиях ограниченной видимости при помощи подводного необитаемого аппарата получается далеко не всегда. Что говорить о системах, где длина кабеля составляет несколько сотен или тысяч метров.

Из существующего программного обеспечения для ГБО, часть предназначена исключительно для просмотра акустических изображений без возможности дальнейшего использования этих данных для построения карт. В то же самое время, многие образцы проприетарного ПО, например ReefMaster, автоматически строят карты на основе привязанных к сонограммам спутниковых координат.

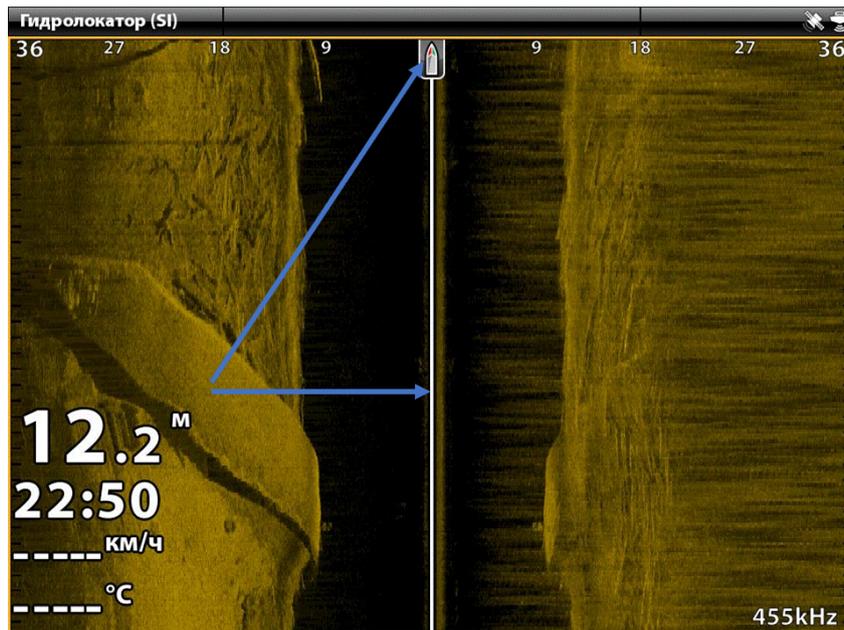


Рис. 1. Акустический снимок затонувшего судна. Стрелками показана разница между реальным нахождением трансдюсера в момент фиксации изображения и положения приемника ГНСС сигнала на борту судна

Используя только изображение с координатами, необходимо в первую очередь определить расстояние от трансдюсера до подводного объекта (аномалии) следующим образом:

$$R = \sqrt{rd^2 - h^2},$$

где  $R$  – реальное расстояние до объекта,  $rd$  – номинальное расстояние,  $h$  – высота трансдюсера над дном. Последнее можно вывести исходя из размеров области акустической тени по обе стороны трансдюсера.

На рис. 2 показан пример того, как в программе StarFish (программа не обладает функцией автоматического построения карт и не имеет возможности подключать растровые карты из библиотек данных). В этом случае происходит стандартная ориентация трансдюсера в трех декартовых координатах и трех плоскостях вращения ( $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ ).

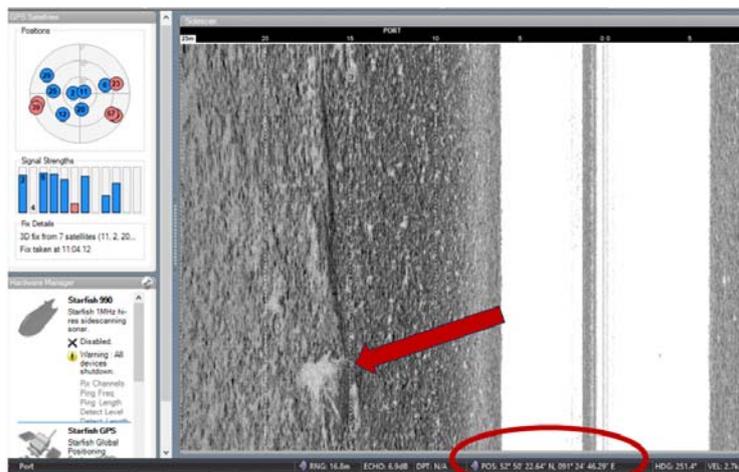


Рис. 2. Фрагмент окна программы StarFish Scanline, с указанием координат подводной аномалии. В верхнем левом углу окна – положение спутников и сила сигнала

При этом измерить абсолютную глубину  $z$ , тангаж  $\varphi$  и крен  $\theta$  могут измеряться только при наличии соответствующего оборудования на локаторе (в большинстве случаев, отсутствует). Остальные три значения определяются в горизонтальной плоскости:  $x$ ,  $y$ ,  $\psi$  [5].

Таким образом, проблема точного определения координат ГБО, а также выявленных им объектов с дальнейшей привязкой, используя системы без дополнительной акустической ориентации (представленных, например в [5]) в виде буев требует дальнейших исследований.

### Библиографические ссылки

1. Blondel P. The handbook of sidescan sonar. Springer – Praxis Publishing, 2009. 316 p.
2. Hamill D., Buscombe D., Wheaton J.M. Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side scan sonar imagery // PLoS ONE. 2018. 13(3): e0194373
3. Kaeser A. J., Litts T. L. An assessment of deadhead logs and large woody debris using side scan sonar and field surveys in streams of southwest Georgia // Fisheries. 2008. N 33(12). P. 589–597.
4. Kaeser A. J., Litts T. L., Tracy T. W. Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the Lower Flint River, Georgia, USA // River Research and Applications. 2012. N 29. P. 634–644.
5. Fallon M. F. et al. Efficient AUV navigation fusing acoustic ranging and side-scan sonar // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – С. 2398–2405.

### References

1. Blondel P. The handbook of sidescan sonar. Springer – Praxis Publishing, 2009. 316 p.
2. Hamill D., Buscombe D., Wheaton J.M. Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side scan sonar imagery // PLoS ONE. 2018. 13(3): e0194373
3. Kaeser A. J., Litts T. L. An assessment of deadhead logs and large woody debris using side scan sonar and field surveys in streams of southwest Georgia // Fisheries. 2008. N 33(12). P. 589–597.
4. Kaeser A. J., Litts T. L., Tracy T. W. Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the Lower Flint River, Georgia, USA // River Research and Applications. 2012. N 29. P. 634–644.
5. Fallon M. F. et al. Efficient AUV navigation fusing acoustic ranging and side-scan sonar // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – С. 2398–2405.

© Гончаров А. Е., Гончарова Е. А., 2023

УДК 528.88, 630

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ХАКАСИИ\*

С. Т. Им<sup>1,2,3\*</sup>, В. Г. Ли<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова  
Российская Федерация, 655017, г. Абакан, пр. Ленина, 90

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>3</sup>Институт леса СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН)  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>4</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*С помощью ГИС и множественного регрессионного анализа рассчитаны и проанализированы картосхемы степени влияния климатических факторов на динамику растительного покрова республики Хакасия в 2000–2021 гг.*

*Ключевые слова: Хакасия, растительный покров, вегетационный индекс NDVI, климат.*

## SPATIAL REGRESSION ANALYSIS OF THE VEGETATION COVER DYNAMICS IN KHAKASSIA

S. T. Im<sup>1,2,3\*</sup>, V. G. Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>N. F. Katanov Khakasian State University  
90, Lenin prospekt, Abakan, 655017, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS)  
50/28, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>4</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira prospekt, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Using GIS and multiple regression analysis, the maps of the impact degree of climatic factors on vegetation cover dynamics of Khakassia were calculated and analyzed for 2000-2021 years.*

*Keywords: Khakassia, vegetation cover, vegetation indices, climate.*

**Введение.** С конца 20 века климатические изменения оказывают существенное влияние на состояние растительного покрова Сибири [1]. Рост температур способствует росту растительного покрова на севере Сибири [2, 3]. Однако, на юге наблюдается гибель части лесов [4]. Для пространственно-временного анализа отклика растительного покрова на современные климатические изменения необходимо использовать данные дистанционного зондирования Земли и методы ГИС. Цель исследования – анализ динамики растительного покрова Хакасии в связи с климатическими трендами в начале 21 века.

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012/> при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

**Объект исследования.** Анализировался растительный покров республики Хакасии (51.5°–55° с.ш.; 88°–92° в.д.; площадь ~61,5 тыс. кв. км).

**Материалы и методы.** Производился попиксельный анализ множественных линейных регрессионных и иерархических уравнений для оценки вклада климатических переменных в динамику растительного покрова. Отбирались только наилучшие значимые уравнения по критерию Акаике. Динамика растительного покрова рассчитывалась на основе вегетационных индексов Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), по данным съемки MODIS за период с 2000 по 2021 гг. с пространственным разрешением 231 м. Использовались помесечные климатические данные, извлеченные из набора данных ERA5-Land (<https://www.ecmwf.int/en/era5-land>) [5]. Гари удалялись из анализа на основе данных MODIS MCD64A1 за весь период наблюдений.

**Результаты.** В целом, после удаления гарей, для 46% анализируемой территории выявлены значимые множественные линейные регрессионные уравнения (ЗМЛР;  $p < 0,05$ ; рис. 1а). Из них 46% включали одну независимую климатическую переменную, 28% – две переменных и 26% – три переменных (рис. 1).

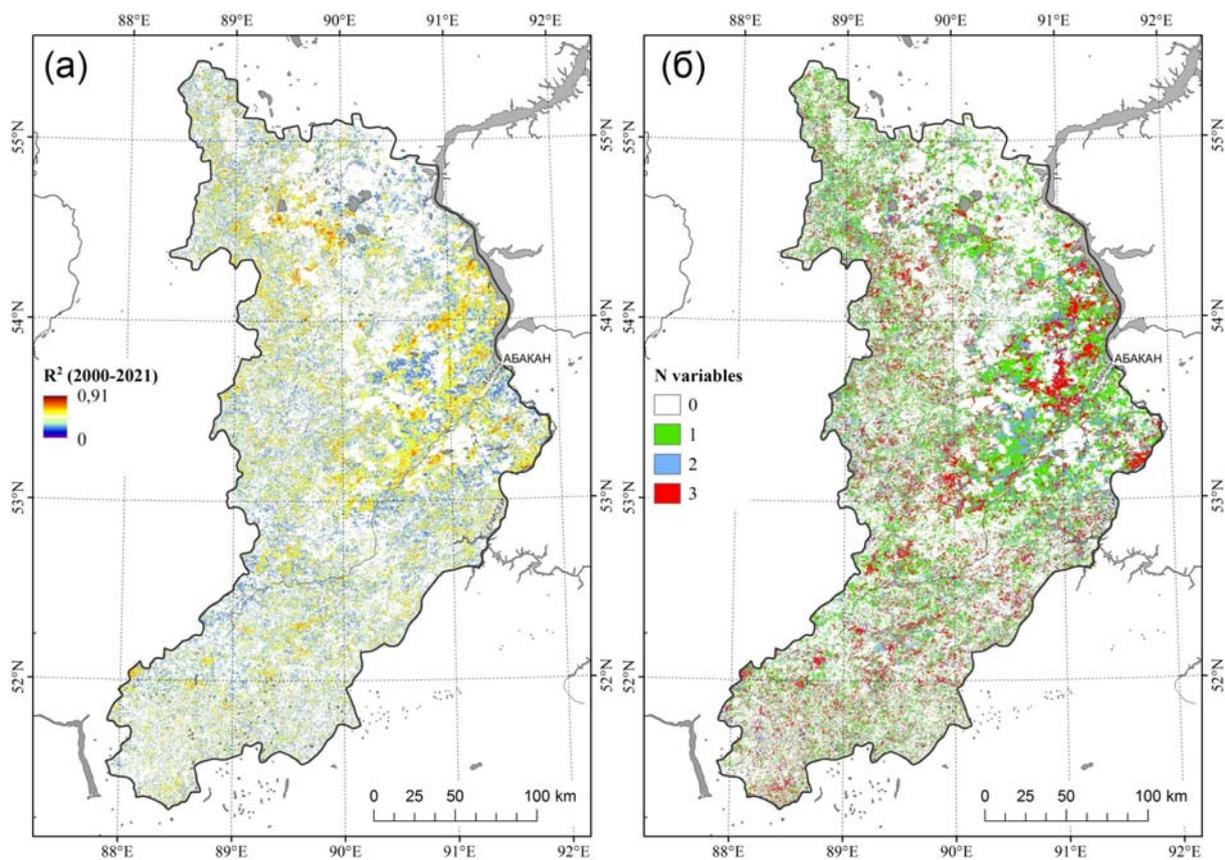


Рис. 1. Картограммы коэффициентов детерминации (а;  $R^2$ ) и количества независимых переменных (б;  $N$ ) для наилучших уравнений множественных линейных регрессий ( $p < 0.05$ ), отобранных по информационному критерию Акаике. Уравнения показывают зависимости динамики индекса NDVI за 2000–2021 гг. на территории Хакасии

Наибольшая доля объясненной дисперсии соответствовала летним осадкам (медианное значение объясненной дисперсии 27,1%), влажности (29,8%) и температуре (27,3%) почвогрунтов.

**Заключение.** В целом, для периода 2000–2021 гг. значимые множественные линейные регрессионные уравнения выявлены для половины анализируемой территории. Наибольшая влияние на динамику растительного покрова оказали летние осадки, влажность и температура почвогрунтов. В дальнейшем, использованную методику и результаты можно использовать для выявления особенностей оказываемого влияния климатических факторов с учетом типа растительного покрова и орографии местности.

### Библиографические ссылки

1. Shi S., Wang P., Zhang Y. [и др.]. Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 133. ID 108446. DOI: 10.1038/s41558-019-0688-1.
2. Myers-Smith I. H., Kerby J. T., Phoenix G. K. [и др.]. Complexity revealed in the greening of the Arctic // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 106–117. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108446.
3. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming // *Journal of Mountain Sciences*. 2021. Vol. 18. P. 3099–3108. DOI: 10.1007/s11629-021-6876-2.
4. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. [и др.]. Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2020. Vol. 30, Issue 2. P. 543–556. DOI: 10.1111/geb.13243.
5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5-Land [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (дата обращения: 10.08.2023).

### References

1. Shi S., Wang P., Zhang Y., Yu J. Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia. *Ecological Indicators*, 2021, Vol. 133, ID 108446. doi: 10.1038/s41558-019-0688-1.
2. Myers-Smith I. H., Kerby J. T., Phoenix G. K., et al. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *Nature Climate Change*, 2020, Vol. 10, P. 106–117. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108446.
3. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming. *Journal of Mountain Sciences*, 2021, Vol. 18, P. 3099–3108. doi: 10.1007/s11629-021-6876-2.
4. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., et al. Climate-driven conifer mortality in Siberia. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, Vol. 30, Issue 2, P. 543–556. doi: 10.1111/geb.13243.
5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5-Land. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (accessed 10.08.2023).

© Им С. Т., Ли В. Г., 2023

УДК 528.88, 630

## РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ГЕНЕРАЦИИ БЕЗОБЛАЧНЫХ КОМПОЗИТОВ ИЗ СНИМКОВ MODIS В СРЕДЕ ESRI ARCGIS\*

С. Т. Им<sup>1,2,3\*</sup>, В. Г. Ли<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт леса СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН)

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, Свободный проспект, 79

<sup>4</sup>Красноярский государственный аграрный университет

Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Средствами ESRI ArcGIS и языка Python создан набор инструментов для автоматизации расчета безоблачного композита по данным съемки MODIS с улучшенным пространственным разрешением.*

*Ключевые слова: инструменты геообработки, ArcGIS, Python, MODIS.*

## DEVELOPMENT OF A TOOL FOR GENERATION OF CLOUDLESS COMPOSITES FROM MODIS IMAGES IN ESRI ARCGIS

S. T. Im<sup>1,2,3\*</sup>, V. G. Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS)

50/28, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Siberian Federal University

79, Svobodnyi prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>4</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University

90, Mira prospekt, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*A toolbox for the automated calculation of cloudless composite scenes with enhanced spatial resolution from MODIS data was created using ESRI ArcGIS and Python и языка Python.*

*Keywords: geoprocessing tools, ArcGIS, Python, MODIS.*

**Введение.** Объемы пространственных данных о земной поверхности возрастают экспоненциально с каждым годом. Например, на серверах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и НИЦ «Планета» в 2023 г. данные съемки из космоса занимают ~5922 Тб [1]. Для решения современных задачи с использованием данных дистанционного зондирования Земли пользователь часто сталкивается с необходимостью автоматизации процессов геообработки. Целью данной работы являлась разработка инструмента генерации безоблачных композитов из снимков MODIS в среде ESRI ArcGIS.

**Материалы и методы.** При использовании современных методов классификации изображений для картографирования обширных территорий на основе съемки MODIS необходимо предварительно рассчитать безоблачные данные. НАСА предоставляет продукты MODIS MOD09Q1 и MOD09A1,

\* Работа выполнялась в рамках проекта № FWES-2021-0008 государственного задания.

представляющие собой фрагменты съемки наземной поверхности в двух и семи спектральных каналах с пространственным разрешением 250 и 500 м, соответственно [2]. Разработка инструментария производилась в среде ESRI ArcGIS и PyCharm с использованием скриптов Python. Созданный инструментарий позволяет из набора исходных растровых данных съемки MODIS MOD09Q1 и MOD09A1, предоставляемых геопорталом НАСА EarthData [3], рассчитать мозаику медианных значений пикселей с фильтрацией облачности. Инструменты позволяют преобразовать спектральные каналы из 461-метрового пространственного разрешения к 231 метрам методом даунскейлинга на основе регрессионных связей и вегетационного индекса NDVI [4].

**Результаты.** В среде ESRI ArcGIS создан набор из восьми связанных моделей геообработки, объединенных в группу инструментов, позволяющих рассчитать безоблачные композиты из исходных данных MODIS MOD09Q1 и MOD09A1 (Рис. 1). Для получения 231 метрового пространственного разрешения создан скрипт MODIS\_downscale250mSelectedChannel3 на языке Python. Для уменьшения времени расчетов в скрипте реализована параллельная обработка спектральных каналов. Графический пользовательский интерфейс инструментов представлен в виде стандартных диалоговых окон в среде ESRI ArcGIS, позволяющих указать входные и выходные параметры вычислений (Рис. 1).

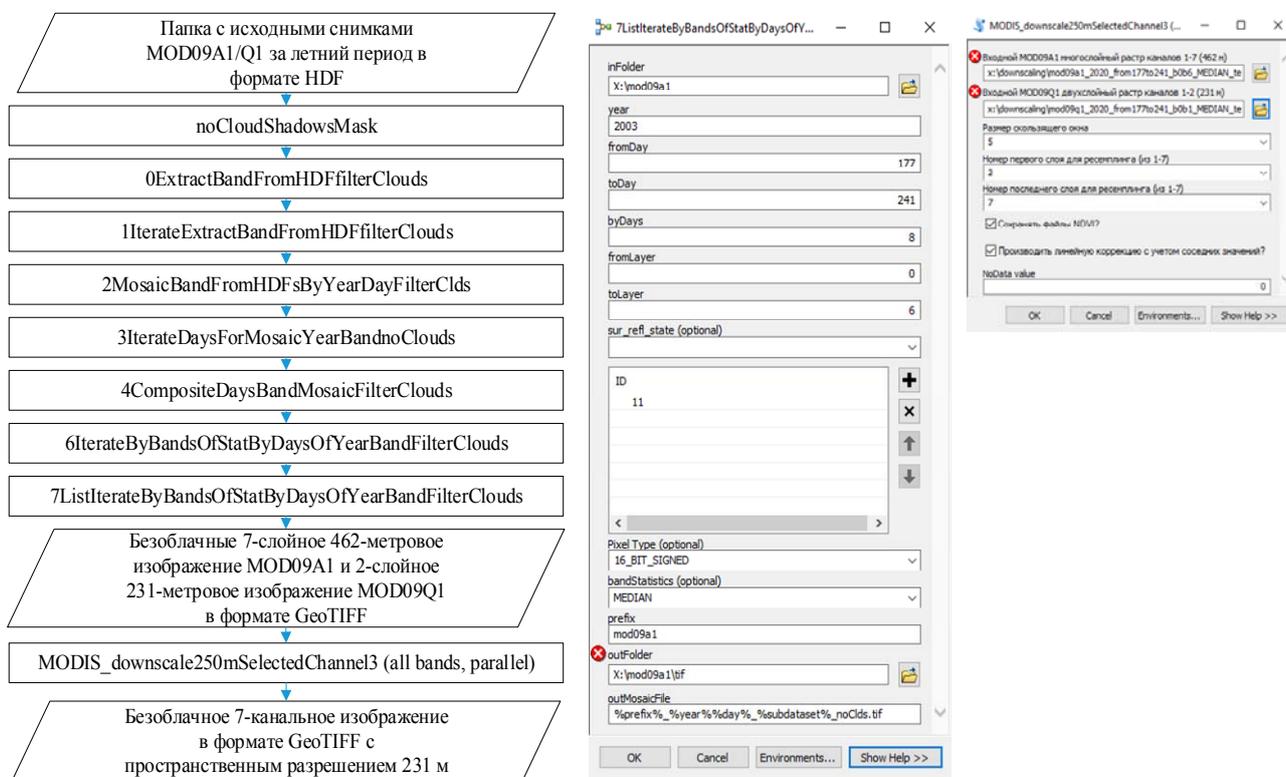


Рис. 1. Блок-схема расчета безоблачного композита по данным съемки MODIS с разрешением 231 м (слева) и графический интерфейс разработанных инструментов (по центру и справа)

Разработанные инструменты интегрированы в наборы инструментов ESRI ArcGIS, что позволяет использовать напрямую из программы ArcMap. Инструменты использовались для создания композитного изображения западной части полуострова Таймыр. Изображение использовалось для расчета картосхемы наземного покрова, использованной при проведении исследований влияния климата на древесную растительность арктической зоны Сибири [5].

**Заключение.** В результате проведенных работ создан набор инструментов для генерации безоблачного композитного изображения на основе продуктов MODIS MOD09A1 и MOD09Q1. Изображение состоит из семи слоев, соответствующих спектральным каналам MODIS с улучшенным пространственным разрешением (231 м). Инструменты успешно апробированы при проведении исследований арктической зоны Сибири.

### Библиографические ссылки

1. Институт космических исследований РАН. Отдел технологий спутникового мониторинга. Веб-страница «Архивы данных» [Электронный ресурс]. URL: <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=483> (дата обращения: 31.08.2023).
2. Roger J. C., Ray J. P., Vermote E. F. MODIS Collection 6.1 (C61) LSR Product User Guide [Электронный ресурс]. 2020. 36 p. URL: [https://lpdaac.usgs.gov/documents/925/MOD09\\_User\\_Guide\\_V61.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/925/MOD09_User_Guide_V61.pdf) (дата обращения: 31.08.2023).
3. Геопортал NASA EarthData. EarthData Search. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (дата обращения: 31.08.2023).
4. Trishchenko A. P., Luo Y., Khlopenkov K. V. A method for downscaling MODIS land channels to 250-m spatial resolution using adaptive regression and normalization // *Proc. SPIE 6366, Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology*. 2006. Vol. 6, ID 636607. DOI: 10.1117/12.689157.
5. Kharuk V. I., Petrov I. A., Im S. T. [и др.]. Pollution and Climatic Influence on Trees in the Siberian Arctic Wetlands // *Water*. 2023. Vol. 15. ID 215. DOI: 10.3390/w15020215.

### References

1. Space Research Institute of Russian Academy of Sciences. Department of Technology of satellite monitoring. Web page «Archiv dannyh» [Data archive]. Available at: <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=483> (accessed 31.08.2023).
2. Roger J. C., Ray J. P., Vermote E. F. MODIS Collection 6.1 (C61) LSR Product User Guide. 2020, 36 p. Available at: [https://lpdaac.usgs.gov/documents/925/MOD09\\_User\\_Guide\\_V61.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/925/MOD09_User_Guide_V61.pdf) (accessed 31.08.2023).
3. NASA's EarthData website. EarthData Search web page. Available at: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (accessed 31.08.2023).
4. Trishchenko A. P., Luo Y., Khlopenkov K. V. A method for downscaling MODIS land channels to 250-m spatial resolution using adaptive regression and normalization. *Proc. SPIE 6366, Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology*, 2006, Vol. 6, ID 636607. doi: 10.1117/12.689157.
5. Kharuk V. I., Petrov I. A., Im S. T., et al. Pollution and Climatic Influence on Trees in the Siberian Arctic Wetlands. *Water*, 2023, Vol. 15, ID 215. doi: 10.3390/w15020215.

© Им С. Т., Ли В. Г., 2023

УДК 519.7 + 004.93

## МЕТОДИКА АГРЕГИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А. В. Лапко<sup>1,2\*</sup>, В. А. Лапко<sup>1,2</sup>, В. П. Тубольцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 44

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*Предлагается методика агрегирования результатов первичной автоматической классификации случайных величин с использованием алгоритма Форель. Разработанная методика является актуальной при анализе данных дистанционного зондирования природных объектов.*

*Ключевые слова: алгоритм автоматической классификации, агрегирование классов, алгоритм Форель, анализ данных дистанционного зондирования.*

## METHODOLOGY FOR AGGREGATION OF THE RESULTS OF AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STATISTICAL DATA

A. V. Lapko<sup>1,2\*</sup>, V. A. Lapko<sup>1,2</sup>, V. P. Tuboltsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*A technique for aggregating the results of the primary automatic classification of random variables using the Forel algorithm is proposed. The developed technique is relevant in the analysis of remote sensing data of natural objects.*

*Keyword: automatic classification algorithm, class aggregation, Forel algorithm, remote sensing data analysis.*

Алгоритм автоматической классификации реализует один из основных этапов системного анализа данных дистанционного зондирования природных объектов [1, 2]. Если количество компактных групп наблюдений в пространстве спектральных признаков элементов земной поверхности большое, то возникает проблема их объединения (агрегирования). Например, при автоматической классификации спектральных данных лесных массивов непараметрическим алгоритмом количество обнаруживаемых классов соответствует нескольким сотням [3, 4]. В предлагается методика агрегирования результатов первичной классификации случайных величин на основе применения алгоритма Форель и выбора его параметра.

Пусть в результате применения непараметрического алгоритма автоматической классификации обнаружено  $M$  классов [4]. Каждый класс соответствует одномодальному фрагменту плотности вероятности  $p(x)$  случайной величины  $x = (x_v, v = \overline{1, k})$ . Обозначим через  $\bar{x}_v^j$ ,  $v = \overline{1, k}$  оценки математических ожиданий компонент случайной величины  $x$  в классах  $\Omega_j$ ,  $j = \overline{1, M}$ .

Рассмотрим задачу повторной автоматической классификации многомерных случайных величин  $\bar{V} = (\bar{x}_v^j, v = \overline{1, k}, j = \overline{1, M})$  при больших значениях  $M$ . В качестве алгоритма автоматической классификации будем использовать, например, алгоритм Форель [5, 6]. Определим  $r$ - окрестность вокруг зна-

чения  $\bar{\Omega}_1$ , которую отнесём к новому классу  $\bar{\Omega}_1$ . Тогда на первом этапе автоматической классификации к  $\bar{\Omega}_1$  будут отнесены значения из массива данных  $\bar{V}$  в соответствии с правилом

$$\bar{m}_1(\bar{x}^j): \bar{x}^j \in \bar{\Omega}_1, \text{ если } d(\bar{x}^t, \bar{x}^j) < r, j = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где

$$d(\bar{x}^t, \bar{x}^j) = \sqrt{\sum_{v=1}^k (\bar{x}_v^t - \bar{x}_v^j)^2}$$

- расстояние между точками  $\bar{x}_v^t$  и  $\bar{x}_v^j$ ,  $v = \overline{1, k}$ .

Пусть на первом этапе автоматической классификации к новому классу  $\bar{\Omega}_1$  будут отнесены элементы массива  $\bar{V}$  с номерами, образующих множество  $I_1^1$  и значение  $t$ . На втором этапе автоматической классификации классу  $\bar{\Omega}_1$  будут отнесены элементы массива  $\bar{V}$ , которые удовлетворяют правилу

$$\bar{m}_2(\bar{x}^j): \bar{x}^j \in \bar{\Omega}_1, \text{ если } d(\bar{x}^i, \bar{x}^j) < r, i \in I_1^1, j \in I \setminus I_1^1, \quad (2)$$

где  $I = (\overline{1, M})$ . Пусть правилу (2) удовлетворяют элементы массива данных  $\bar{V}$  с номерами  $I_1^2$ . На этом этапе новый класс  $\bar{\Omega}_1$  образуется элементами  $\bar{x}^j$  массива данных  $\bar{V}$  с номерами  $I_2(1) = (I_1^1 \cup I_1^2)$ , которые исключаются из множества  $I$ .

По аналогии на этапе под номером  $q$  автоматической классификации к  $\bar{\Omega}_1$  относятся элементы массива данных  $\bar{V}$  в соответствии с решающим правилом

$$\bar{m}_q(\bar{x}^j): \bar{x}^j \in \bar{\Omega}_1, \text{ если } d(\bar{x}^i, \bar{x}^j) < r, i \in I_1^{q-1}, j \in I \setminus I_{q-1}(1). \quad (3)$$

Эта процедура автоматической классификации продолжается до тех пор, пока множество  $I \setminus I_{q-1}(1)$  не будет равно нулю. Обозначим множество номеров элементов из массива данных  $\bar{V}$ , отнесённых с процедурами автоматической классификации типа (1), (2), (3) к новому классу  $\bar{\Omega}_1$ , через  $I(1)$ .

Из оставшихся элементов массива  $\bar{V}$  за исключением их номеров  $I(1)$  выбирается новый элемент  $\bar{x}^t$  и приведённая выше процедура автоматической классификации повторяется для обнаружения нового класса  $\bar{\Omega}_2$ . В результате классы  $\Omega_j$ ,  $j = \overline{1, M}$  будут объединены в новые образования  $\bar{\Omega}_j$ ,  $j = \overline{1, M(r)}$ ,  $M(r) < M$ .

Если значение  $r$  близко к нулю, то  $M(r)$  будет соизмеримо с количеством классов  $M$ . При увеличении  $r$  значения  $M(r)$  уменьшаются и стремятся к единице. Организуем вычислительный эксперимент для определения вида зависимости  $M(r)$ . Нетрудно заметить, что при этом могут возникать условия, когда при изменении значения  $r$  в относительно большом интервале количество новых классов  $M(r)$  может не изменяться (рис. 1).

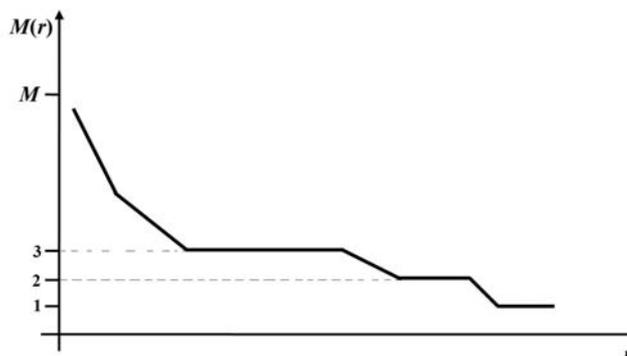


Рис. 1. Иллюстрация возможного варианта зависимости  $M(r)$

В соответствии с примером, представленным на рис. 1, исходные классы могут быть объединены в две устойчивые их группы при  $M(r)=2$  и  $M(r)=3$ . Для обоснования этих групп необходимо привлекать дополнительную информацию об элементах исследуемой земной поверхности, которая характеризуется исходными спектральными признаками.

### Библиографические ссылки

1. Лапко А.В., Лапко В.А. Ядерные оценки плотности вероятности и их применение. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2021. 308 с.
2. Развитие и применение информационных технологий исследования природных ресурсов территорий Сибири на основе данных дистанционного зондирования / И. В. Зеньков, С. Т. Им, А. В. Лапко, В. А. Лапко и др. Красноярск: СибГАУ, 2017. 280 с.
3. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им, В. П. Тубольцев, В. Л. Авдеенок // Автометрия. 2019. Т.55, №3. С. 22–30.
4. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объёма и его применение / И. В. Зеньков, А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им, В. П. Тубольцев, В. Л. Авдеенок // Компьютерная оптика. 2021. Т.45, №2. С. 253–260.
5. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализ данных и знаний. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. 270 с.
6. Загоруйко Н. Г. Когнитивный анализ данных. Новосибирск: ГЕО, 2013. 186 с.

### References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. *Yadernye otsenki plotnosti veroyatnosti i ikh primeneniye* [Kernel probability density estimates and their applications]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetnev Publ., 2021, 208 p. (In Russ.)
2. Zenkov I. V., Im S. T., Lapko A. V., Lapko V. A., Muzalevsky K. V., Okhotkina E. A., Ruzhechka Z. Z., Kharuk V. I., Yuronen Yu. P. *Razvitie i primeneniye informatsionnykh tekhnologii issledovaniya prirodnnykh resursov territorii Sibiri na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Development and application of information technologies for the study of natural resources of Siberian territories based on remote sensing data]. Krasnoyarsk: SibGAU Publ., 2017. 280 p. (In Russ.)
3. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. A. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 3, p. 230–236.
4. Zenkov I. V., Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. L. [A nonparametric algorithm for automatic classification of large multivariate statistical data sets and its application]. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 2, p. 253–260. (In Russ.)
5. Zagoruiko N. G. *Prikladnye metody analiz dannykh i znanii* [Applied methods of data and knowledge analysis]. Novosibirsk, IM SO RAN Publ., 1999, 270 p. (In Russ.)
6. Zagoruiko N. G. *Kognitivnyi analiz dannykh* [Cognitive data analysis]. Novosibirsk, GEO Publ., 2013, 186 p. (In Russ.)

© Лапко А. В., Лапко В. А., Тубольцев В.П., 2023

УДК 519.7

## ОЦЕНИВАНИЕ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПО ДАННЫМ БОЛЬШОГО ОБЪЁМА

А. В. Лапко<sup>1,2\*</sup>, В. А. Лапко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 44

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*Проводится сравнение эффективности методов оценивания числовых характеристик семейства логнормальных законов распределения по исходным статистическим данным и результатами их декомпозиции с использованием традиционных формул дискретизации.*

*Ключевые слова: логнормальный закон распределения, числовые характеристики плотности вероятности, формулы дискретизации.*

## ESTIMATION OF NUMERICAL CHARACTERISTICS OF THE RANDOM VARIABLE DISTRIBUTION LAW BASED ON LARGE VOLUME DATA

A. V. Lapko<sup>1,2\*</sup>, V. A. Lapko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*The efficiency of methods for estimating numerical characteristics of a family of lognormal distribution laws based on initial statistical data and the results of their decomposition using traditional discretization formulas is compared.*

*Keyword: lognormal distribution law, numerical characteristics of probability density, sampling formulas.*

Оценки числовых характеристик законов распределения случайных величин используется при обосновании выбора алгоритмов принятия решений и определении их эффективности по данным вычислительного эксперимента. Для оценивания числовых характеристик законов распределения в условиях больших объёмов статистических данных предварительно используются методики их декомпозиции. Цель исследований состоит в сравнении эффективности методов оценивания числовых характеристик семейства логнормальных законов распределения по исходным статистическим данным и результатами их декомпозиции с использованием известных формул дискретизации.

Имеется выборка  $V = (x^i, i = \overline{1, n})$  статистически независимых наблюдений случайной величины с неизвестным законом распределения  $p(x)$ . В качестве основных числовых характеристик  $p(x)$ , определяемых по выборке  $V$ , используются оценки математического ожидания  $\bar{x}$  и среднего квадратического отклонения  $\bar{\sigma}$ .

Пусть область значений случайной величины  $x$  разбита на  $N$  равных непересекающихся интервалов. На этой основе преобразуем выборку  $V$  в массив данных  $\tilde{V} = (z^j, \bar{P}^j, j = \overline{1, N})$ , где  $z^j$  – центр  $j$ -го интервала дискретизации области значений случайной величины  $x$ , а  $\bar{P}^j$  – частота принадлежности элементов выборки  $V$  этому интервалу  $[1, 2]$ . Тогда оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения случайной величины  $x$  определяются соответственно выражениями

$$\tilde{x} = \sum_{j=1}^N z^j \bar{P}^j, \quad \tilde{\sigma} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (z^j - \tilde{x})^2 \bar{P}^j}.$$

Традиционными методами дискретизации области значений одномерной случайной величины являются формулы Старджесса [3], Брукса – Каррузера [4], Хайнхольда – Гаеде [5]:

$$N_1 = \log_2 n + 1, N_2 = 5 \lg n, N_3 = \sqrt{n}.$$

Сравним эффективность методов оценивания приведённых числовых характеристик плотности вероятности  $p(x)$  по исходной выборке  $V$  случайной величины  $x$  и массива данных  $\tilde{V}$ . Исходные статистические данные  $V = (x^i, i = \overline{1, n})$  формировались датчиком случайной величины  $x$  с логнормальным законом распределения

$$p(x) = \frac{1}{s x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-(\ln x - a)^2 / (2s^2)\right)$$

при значениях параметра  $s=(0,125; 0,5)$  и  $a=0$ . Подобный закон распределения характерен, например, для спектральных признаков данных дистанционного зондирования природных объектов [6-8].

Объём выборки  $V$  считался равным  $n=1000$  и  $n=50000$ . В этих условиях вычислялись значения оценок числовых характеристик  $\bar{x}, \bar{\sigma}, \tilde{x}, \tilde{\sigma}$  плотности вероятности  $p(x)$ . При конкретных значениях объёма  $n$  выборки  $V$ , параметра  $s$  плотности вероятности  $p(x)$  оценки её числовых характеристик  $\bar{x}, \bar{\sigma}$  и  $\tilde{x}, \tilde{\sigma}$  вычислялись 50 раз. Средние значения  $\bar{x}, \bar{\sigma}, \tilde{x}, \tilde{\sigma}$  обозначим через  $\bar{\bar{x}}, \bar{\bar{\sigma}}, \tilde{\tilde{x}}, \tilde{\tilde{\sigma}}$  соответственно. Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Результаты оценивания математического ожидания  $M(x)$  по выборкам  $V$  и массивам данных  $\tilde{V}(t), t = \overline{1, 3}$ .**

n	$\bar{\bar{x}}$	$\tilde{\tilde{x}}(1) / N_1$	$\tilde{\tilde{x}}(2) / N_2$	$\tilde{\tilde{x}}(3) / N_3$
s=0,125, M(x)=1,0078				
1000	1,0081	1,0081 / 11	1,0081 / 15	1,0081 / 32
50000	1,0078	1,0078 / 17	1,0078 / 23	1,0078 / 224
s=0,5, M(x)=1,1331				
1000	1,1315	1,1318 / 11	1,1314 / 15	1,1316 / 32
50000	1,1330	1,1318 / 17	1,1328 / 23	1,1330 / 224

Таблица 2

**Результаты оценивания среднего квадратического отклонения  $\sigma(x)$  по выборкам  $V$  и массивам данных  $\tilde{V}(t), t = \overline{1, 3}$ .**

n	$\bar{\bar{\sigma}}$	$\tilde{\tilde{\sigma}}(1) / N_1$	$\tilde{\tilde{\sigma}}(2) / N_2$	$\tilde{\tilde{\sigma}}(3) / N_3$
s=0,125, $\sigma(x)=0,1265$				
1000	0,1267	0,1285 / 11	0,1276 / 15	0,1268 / 32
50000	0,1265	0,1278 / 17	0,1272 / 23	0,1265 / 224
s=0,5, $\sigma(x)=0,6039$				
1000	0,6029	0,6157 / 11	0,6087 / 15	0,6036 / 32
50000	0,6008	0,6165 / 17	0,6087 / 23	0,6008 / 224

С увеличением параметра  $s$  логнормальной плотности вероятности случайной величины  $x$  значения  $M(x), \sigma(x)$  увеличиваются (табл. 1, 2). Причём относительные ошибки оценивания  $M(x), \sigma(x)$  по выборке  $V$  изменяются незначительно. Например, при  $s=0,125$  и  $n=1000$  отношение  $|M(x) - \bar{x}| / M(x) = 0,0003$ . При  $n=50000$  это отношение равно нулю (табл. 1). Примем значение  $s=0,5$  и  $n=1000$ . Тогда относительная ошибка  $|M(x) - \bar{x}| / M(x) = 0,0014$ . Это отношение при  $n=50000$  близко к нулю.

Сравним результаты оценивания числовых характеристик плотности вероятности  $p(x)$  по выборкам  $V$  и массивам данных  $\tilde{V}(t), t = \overline{1, 3}$ , которые соответствуют используемым формалам дискретизации. Оценки математического ожидания  $M(x)$ , вычисляемых по этим данным, совпадают при  $s=0,125$  и  $n=1000, n=50000$ . При увеличении параметра  $s$  до 0,5 значения  $\bar{\bar{x}}$  и  $\tilde{\tilde{x}}$  совпадают при использовании формулы дискретизации Хайнхольда – Гаеде. Этот факт объясняется большим количеством интервалов дискретизации ( $N_3=224$ ), которые определяются этой формулой, по сравнению с другими

методами ( $N_1=17$ ,  $N_2=23$ ) (табл. 1). Преимущество формулы дискретизации Хайнхольда – Гаеде проявляется также при больших объемах  $n$  статистических данных.

Обнаруженные закономерности сохраняются и при оценивании среднего квадратического отклонения случайной величины  $x$  с плотностью вероятности  $p(x)$  (табл. 2). При этом относительные расхождения между  $\overline{\sigma}$ ,  $\tilde{\sigma}$  несколько больше по сравнению с  $\overline{x}$  и  $\tilde{x}$  (табл. 1, 2). Это объясняется нелинейной зависимостью  $\overline{\sigma}$  и  $\tilde{\sigma}$  от исследуемых случайных величин. Формула дискретизации Хайнхольда – Гаеде интервала значений случайной величины  $x$  является более предпочтительной по сравнению с формулами Старджесса и Брукса–Каррузера.

Полученные выводы являются достоверными при сравнении законов распределения случайных величин  $\overline{x}$ ,  $\tilde{x}$  и  $\overline{\sigma}$ ,  $\tilde{\sigma}$  при использовании критерия Смирнова с уровнем значимости 0,05.

### Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Ядерные оценки плотности вероятности и их применение. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2021. 308 с.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические системы обработки информации и принятия решений. Красноярск: СибГАУ, 2014. 382 с.
3. Sturges H. A. The choice of a class interval // *Journal of the American Statistical Association*. 1926. Vol. 21. P. 65–66. DOI: 10.1080/01621459.1926.10502161
4. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.: Мир, 1970. 368 с.
5. Heinhold I., Gaede K. W. *Ingenieur statistic*. München – Wien: Springer Verlag, 1964. 352 p.
6. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномерным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им, В. П. Тубольцев, В. Л. Авдеенок // *Автометрия*. 2019. Т.55, №3. С. 22–30.
7. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объема и его применение / И. В. Зеньков, А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им, В. П. Тубольцев, В. Л. Авдеенок // *Компьютерная оптика*. 2021. Т.45, №2. С. 253–260.
8. Лапко А. В., Лапко В. А. Информационные средства оценивания состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования на основе непараметрических методов распознавания образов. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2020. 92 с.

### References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. *Yadernye otsenki plotnosti veroyatnosti i ikh primeneniye* [Kernel probability density estimates and their applications]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetnev Publ., 2021, 208 p. (In Russ.)
2. Lapko A. V., Lapko V. A. *Neparametricheskie sistemy obrabotki informatsii i prinyatiya reshenii* [Nonparametric systems for information processing and decision making]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2014, 282 p. (In Russ.)
3. Sturges H. A. The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, vol. 21, p. 65–66. DOI: 10.1080/01621459.1926.10502161
4. Shtorm R. *Teoriya veroyatnostei. Matematicheskaya statistika. Statisticheskii kontrol' kachestva* [Probability Theory. Math statistics. Statistical quality control]. Moscow, Mir Publ., 1970, 368 p. (In Russ.)
5. Heinhold I., Gaede K. W. *Ingenieur statistic*. München – Wien, Springer Verlag Publ., 1964, 352 p.
6. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. A. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 3, p. 230–236.
7. Zenkov I. V., Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. L. [A nonparametric algorithm for automatic classification of large multivariate statistical data sets and its application]. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 2, p. 253–260. (In Russ.)
8. Lapko A. V., Lapko V. A. *Informatsionnye sredstva otsenivaniya sostoyanii prirodnykh ob"ektov po dannym distantsionnogo zondirovaniya na osnove neparametricheskikh metodov raspoznavaniya obrazov* [Information tools for assessing the states of natural objects based on remote sensing data based on nonparametric pattern recognition methods]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetnev Publ., 2020, 92 p. (In Russ.)

УДК 528.88

## ДИНАМИКА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ВЕЧНОЗЕЛЕННЫХ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

В. П. Тубольцев<sup>1</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\* E-mail: Vitalya.98@mail.ru

*Рассматриваются промежуточные результаты анализа динамики эвапотранспирации вечнозелёных хвойных лесов Красноярского края на основе данных дистанционного зондирования Земли. Приведен отрывок из кода получения данных MOD16A2 и обработки их.*

*Ключевые слова: эвапотранспирация, данные дистанционного зондирования.*

## DYNAMICS OF EVAPOTRANSPIRATION OF EVERGREEN CONIFEROUS FORESTS OF THE KRASNOYARSK TERRITORY

V. P. Tuboltsev<sup>1</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\* E-mail: Vitalya.98@mail.ru

*The intermediate results of the analysis of the dynamics of evapotranspiration of evergreen coniferous forests of the Krasnoyarsk Krai on the basis of remote sensing data of the Earth are considered. An excerpt from the code for receiving MOD16A2 data and processing them is given.*

*Keywords: evapotranspiration, remote sensing data.*

Проведение анализа динамики экологического показателя начинается с поиска информации и подбора данных. Целью работы было определить изменения эвапотранспирации вечнозеленых хвойных лесов на территории Красноярского края. Первым этапом был поиск границ исследуемой территории в формате векторных данных. Основой для формирования шейп-файла с границей необходимого типа леса были карты, созданные из классификаций спектрально-временных характеристик, полученных на основе данных MODIS [1]. Продукт MCD12Q1 представляет набор научных данных, отображающих глобальный растительный покров с пространственным разрешением 500 метров. Данные были скачаны с сайта [www.earthdata.nasa.gov](http://www.earthdata.nasa.gov) за 2022 год. На рисунке 1 представлена карта растительного покрова (MCD12Q1). Из растрового формата в векторный были конвертированы пиксели с номером 1, который обозначает вечнозеленые хвойные леса.

Следующий этап – формирование массива данных эвапотранспирации на исследуемую территорию. Для этого было организовано машинное скачивание продукта MOD16A2, алгоритм которого основан на логике уравнения Пенмана-Монтейта и использует в качестве входных данных ежедневный метеорологический анализ и 8-дневную динамику свойств растительности, полученную с помощью дистанционного зондирования [2].

Посредством языка программирования Python был сформирован код для поиска сцен с учетом фильтра [3], получение URL ссылок для скачивания и непосредственно загрузки данных. Рисунок 2 демонстрирует часть исполнительного кода, реализующего поиск сцен MOD16A2 в период с 1 января 2000 года по 1 января 2023 года, с номерами вертикальных тайлов от 22 до 23.

Сформированный массив данных MOD16A2 с параметрами вертикального и горизонтального тайлов 23 и 3 соответственно в формате hdf и шейп-файл с границами вечнозеленых хвойных лесов были обработаны при помощи библиотек numpy, rasterio, rasterstat, geopandas для вычисления зональной

статистики [4]. В результате были получены статистические показатели эвапотранспирации: минимальное и максимальное значения, математическое ожидание, сумма, среднее квадратичное отклонение и медиана. На рисунке 3 представлена динамика математического ожидания эвапотранспирации по данным продукта MOD16A2.

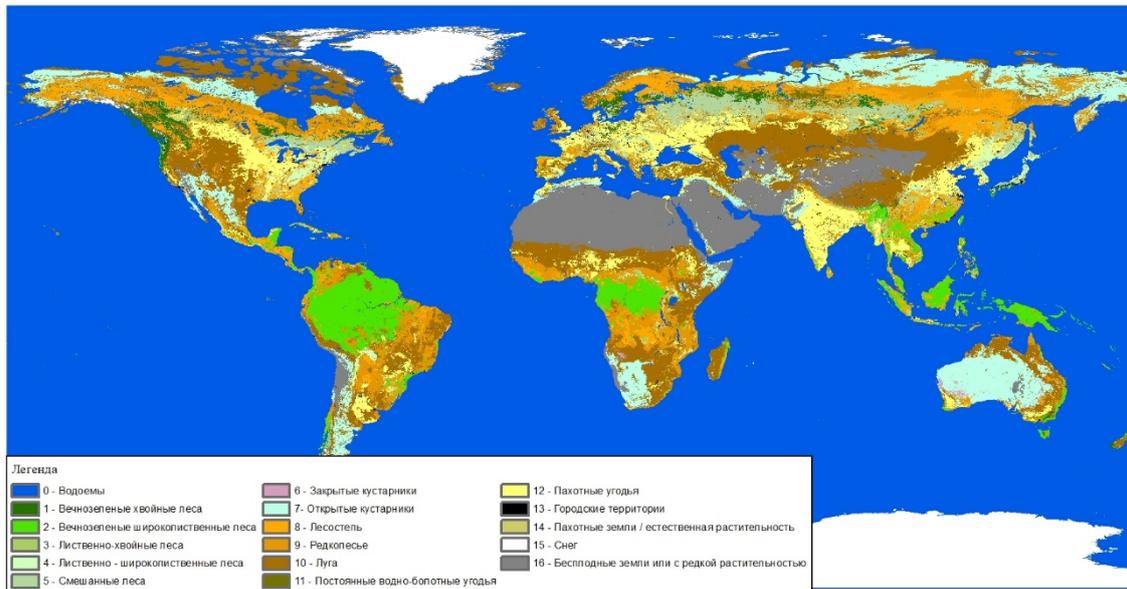


Рис. 1. Карта растительного покрова по данным MCD12Q1

```

serviceUrl = https://m2m.cr.usgs.gov/api/api/json/stable/
payload = {
  'username': username,
  'password': password}
apiKey = sendRequest(serviceUrl + "login", payload)
datasetName = {'datasetName': datasetName}
datasets = sendRequest(serviceUrl + "dataset-search", datasetName, apiKey)
acquisitionFilter = {
  "end": "2023-01-01",
  "start": "2000-01-01"}
metadataFilter = {
  'filterType': 'and',
  'childFilters': [{
    'filterId': '620bac0a8f836a52',
    'filterType': 'between',
    'firstValue': 22,
    'secondValue': 23}]}
payload = {
  'datasetName': dataset['datasetAlias'],
  'maxResults': 1000,
  'sceneFilter': {
    'metadataFilter': metadataFilter,
    'acquisitionFilter': acquisitionFilter}}
scenes = sendRequest(serviceUrl + "scene-search", payload, apiKey)
    
```

Рис. 2. Авторизация, настройка фильтра, поиск и получение URL ссылок для скачивания

Из рис. 3 отчетливо видна сезонная зависимость эвапотранспирации с максимальными значениями в вегетационный период. Стоит отметить, что наибольшие показатели в 2005 и 2015 годах, наименьший в 2001 году. Посредством программного продукта Microsoft Office Standard 2019 были рассчитаны коэффициенты уравнения линейного тренда ( $y = ax + b$ ) и величина достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) [5].

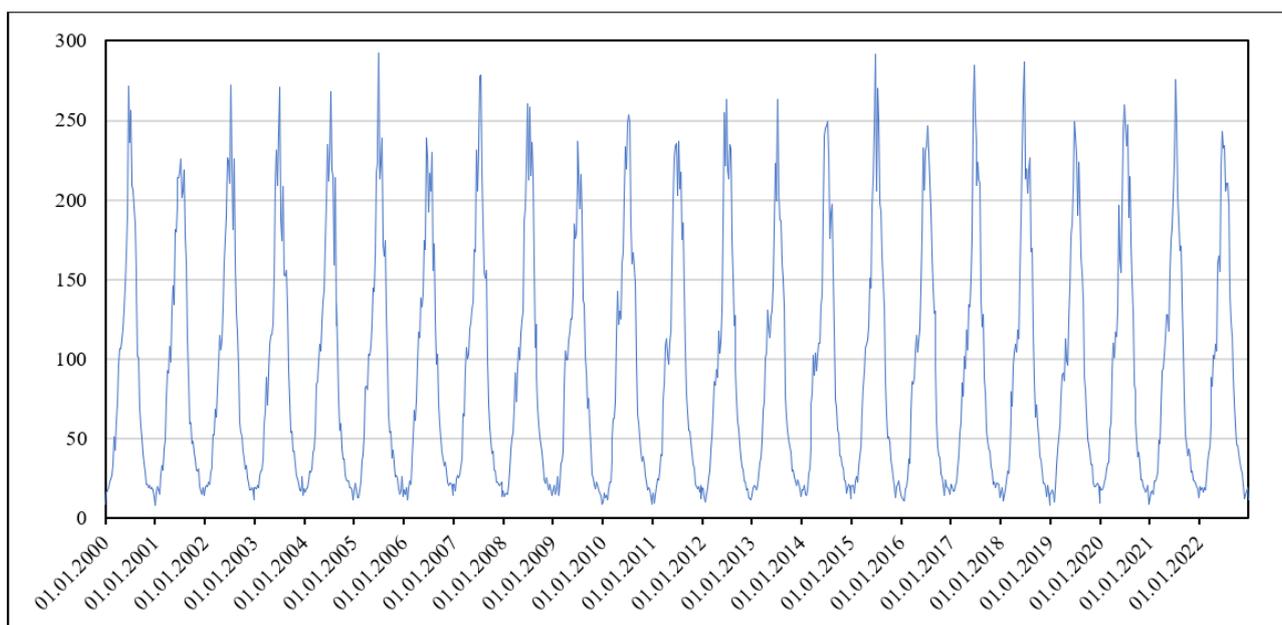


Рис. 3. Динамика математического ожидания эвапотранспирации вечнозеленых хвойных лесов Красноярского края по данным продукта MOD16A2

Коэффициент  $a = 0.0003$  указывает на положительный наклон,  $b = 79.112$  – пересечение графика с осью ординат,  $R^2 = 0.00008$  сигнализирует о плохом совпадении расчетной прямой с исходными данными, прогнозы могут быть не точными, связано это с большим разбросом значений анализируемой выборки.

#### Библиографические ссылки

1. MCD12Q1 v006 [Электронный ресурс]. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/> (дата обращения: 01.09.2023)
2. MOD16A2 v006 [Электронный ресурс]. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/> (дата обращения: 01.09.2023)
3. Example API Service Script [Электронный ресурс]. URL: [https://m2m.cr.usgs.gov/api/docs/example/download\\_data.py](https://m2m.cr.usgs.gov/api/docs/example/download_data.py) (дата обращения: 01.09.2023)
4. Zonal Statistics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geosnips.com/tutorials/python-compute-zonal-statistics> (дата обращения: 01.09.2023)
5. Параметры линии тренда в Office [Электронный ресурс]. URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/параметры-линии-тренда-в-office-92157920-fee4-4905-bc89-6a0f48152c52> (дата обращения: 01.09.2023)

#### References

1. MCD12Q1 v006. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/> (accessed: 01.09.2023)
2. MOD16A2 v006. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/> (accessed: 01.09.2023)
3. Example API Service Script. Available at: [https://m2m.cr.usgs.gov/api/docs/example/download\\_data.py](https://m2m.cr.usgs.gov/api/docs/example/download_data.py) (accessed: 01.09.2023)
4. Zonal Statistics. Available at: <https://www.geosnips.com/tutorials/python-compute-zonal-statistics> (accessed: 01.09.2023)
5. Параметры линии тренда в Office. Available at: <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/параметры-линии-тренда-в-office-92157920-fee4-4905-bc89-6a0f48152c52> (accessed: 01.09.2023)

© Тубольцев В. П., 2023

УДК 528.88

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. П. Тубольцев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\* E-mail: Vitalya.98@mail.ru

*Рассматривается понятие эвапотранспирации, факторы, влияющие на нее, единицы измерения, способы ее определения и возможность применения данных дистанционного зондирования для ее оценки.*

*Ключевые слова: эвапотранспирация, данные дистанционного зондирования.*

## DETERMINATION OF EVAPOTRANSPIRATION BASED ON REMOTE SENSING DATA

V. P. Tuboltsev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\* E-mail: Vitalya.98@mail.ru

*The concept of evapotranspiration, factors affecting it, units of measurement, methods of its definition and the possibility of using remote sensing data for its assessment are considered.*

*Keywords: evapotranspiration, remote sensing data.*

Оценка эвапотранспирации (ЕТ) имеет решающее значение для эффективного управления водными ресурсами, понимания гидрологических и экологических процессов и понимания взаимосвязей между атмосферой, гидросферой и биосферой. [1] Эвапотранспирация – это сложное явление, сочетающее процессы испарения и транспирации, на которые влияет набор биофизических и экологических факторов.

Испарение (Е) проходит с множества поверхностей и для преобразования воды в пар необходима энергия. Эта энергия обеспечивается прямой солнечной радиацией и температурой воздуха. Процесс испарения замедляется и может прекратиться в случае, когда воздух, насыщенный влагой, не перемещается в атмосферу. Замена влажного воздуха сухим обеспечивается ветром и зависит от его скорости. На испарение воздействуют: солнечная радиация, температура воздуха, влажность воздуха и скорость ветра степень затененности кроны растений, частые дожди, орошение, поступление воды из близко залегающих грунтовых вод.

Транспирация (Т) состоит из превращения воды, содержащейся в тканях растений, в пар и его перемещения в атмосферу. Образование пара происходит в межклеточном пространстве листа и его обмен с атмосферой контролируется мелкими отверстиями в листьях. Почти вся вода, взятая корнями из почвы, расходуется на транспирацию, и лишь незначительная ее часть используется внутри растения. При оценке транспирации необходимо рассматривать такие факторы, как радиация, температура воздуха, влажность воздуха, параметры ветра, влажность почвы и ее способность поставлять воду корням, характеристики растений, экологические аспекты и практика земледелия.

Для определения оценки ЕТ используют методы измерения элементов энергетического и водного балансов, применяют лизиметры и эвапориметры. Используя лизиметры изолируют корневую зону от окружающей среды и определяют различные составляющие водного баланса. [2] Эвапориметр используют для определения эталонной эвапотранспирации (ЕТ<sub>0</sub>) путем наблюдения за потерями на испарение с водной поверхности и применения эмпирических коэффициентов для вывода зависимо-

стей.  $ET_0$  обеспечивает стандарт с которым можно сравнивать показатели в разные периоды года и сравнить их для разных культур. Скорость ET обычно выражается в миллиметрах в единицу времени и определяет количество воды, потерянной с культивируемой площади в единицах толщины слоя воды.

Единицей времени может быть час, день, декада, месяц или даже целиком вегетационный период. Для оценки  $ET_0$  по метеоданным выведено множество эмпирических и полуэмпирических уравнений. В результате экспертной консультации, состоявшейся в мае 1990 г., метод Пенмана – Монтейта был рекомендован в качестве стандартного метода для определения  $ET_0$ .

Сочетание данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) и моделей машинного обучения позволяет увеличить точность и скорость оценки ET, а также уменьшить объем данных, требующих обработки. Используя ДЗЗ Земли и модифицированную формулу Пенмана – Монтейса можно рассчитать  $ET_0$ . [3]

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

где  $ET_0$  – эталонная эвапотранспирация [мм сут-1];  $R_n$  – чистая радиация на поверхности растений [МДж м-2 сут-1];  $G$  – плотность теплового потока почвы [МДж м-2 сут-1];  $T$  – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [оС];  $u_2$  – скорость ветра на высоте 2 м [м с-1];  $e_s$  – давление пара насыщения [кПа];  $e_a$  – фактическое давление [кПа];  $(e_s - e_a)$  – дефицит давления пара насыщения [кПа];  $\Delta$  – уклон кривой давления пара [кПа оС-1];  $\gamma$  – психрометрическая постоянная [кПа оС-1].

Переменные для оценки ET включают климатические факторы (максимальная и минимальная температура, скорость ветра, относительная влажность, продолжительность и интенсивность солнечной радиации), свойства почвы (влажность почвы, тип культуры, методы ведения сельского хозяйства, текстура почвы) и свойства растений (тип растения, стадия роста, форма листьев, общее количество воды потенциал внутри листа). [4] Исходные данные можно получить из двух источников: наземные наблюдения и дистанционное зондирование. [5] Наземные данные хранятся в глобальных базах данных (GLAM, GLASS, GLDAS), а также могут быть получены с метеостанций. Основными источниками ДЗЗ для оценки ET выступают данные MODIS, Landsat, AVHRR/NOAA, GRACE и Sentinel. По ним выполняется расчеты индексов растительности (NDVI, SAVI, EVI, LAI), фотосинтетическая активная радиация (PAR), альбедо поверхности ( $\alpha$ ), температура поверхности (LST), цифровая модель рельефа (DEM).

В условиях ограниченности вычислительных мощностей можно прибегнуть к использованию готовых продуктов, например, MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product. Он обладает хорошей производительностью при разумной точности по сравнению с анализом климатических данных. [6]

Совершенствование аппаратуры спутниковых аппаратов позволяет улучшить точность определения биофизических параметров и проводить их оперативный мониторинг. При этом остаются проблемы использования ДЗЗ связанные с шумом сенсора, облачным покровом, тенями, углом обзора спутника и пространственно-временным разрешением. Последнее минимизируется путем комбинации данных различных датчиков, например, объединение изображений, полученных с космических аппаратов типа Landsat, Sentinel и прибора MODIS.

### Библиографические ссылки

1. A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data / Shima Amani, Hossein Shafizadeh-Moghadam // *Agricultural Water Management*. 2023. V. 284.
2. Об определении величин испаряемости / Н. Н. Иванов // *Известия ВГО*. 1954. Т. 86, № 2. С. 189–196.
3. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation / Allen, R.G., Walter, I.A., Elliot, R.L., Howell, T.A., Su, D.I.; Jensen, M.E., Snyder, R.L. // *American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA*, 2000, p. 209-215
4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. / *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements* // *FAO Irrigation and drainage paper*. Rome. 1998. no. 56. p. 300.

5. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya / Maeda, E.E., Wiberg, D.A., Pellikka, P.K. // *Applied Geography*. 2011. vol. 31. p. 251-258.
6. Faisal A., Indarto I., Novita E., Budiyo B. Y. / An evaluation of MODIS Global Evapotranspiration Product (MOD16A2) as terrestrial evapotranspiration study in Manokwari – West Papua – Indonesia. // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. vol. 15, no. 4, p. 510-513.

### **References**

1. Shima Amani, Hossein Shafizadeh-Moghadam. A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. [*Agricultural Water Management*]. vol. 284, 2023.
2. N. N. Ivanov. On the determination of the values of evaporation. [*News of the VGO*]. t. 86, no. 2, p. 189-196, 1954.
3. Allen, R.G., Walter, I.A., Elliot, R.L., Howell, T.A., Su, D.I.; Jensen, M.E., Snyder, R.L. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. [*American Society of Civil Engineers*]. Reston, VA, USA, 2000, p. 209-215
4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. [*FAO Irrigation and drainage paper*]. no. 56, Rome, 1998, p. 300.
5. Maeda, E.E., Wiberg, D.A., Pellikka, P.K.. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. [*Applied Geography*]. vol. 31, p. 251-258, 2011.
6. Faisal A., Indarto I., Novita E., Budiyo B. Y.. An evaluation of MODIS Global Evapotranspiration Product (MOD16A2) as terrestrial evapotranspiration study in Manokwari – West Papua – Indonesia. [*ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*]. vol. 15, no. 4, p. 510-513, 2020.

© Тубольцев В. П., 2023

УДК 528.88

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ  
ТИХОГО ОКЕАНА В ПЕРИОД С 2005 ПО 2021 ГОД  
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Ю. П. Юронен\*, И. Р. Насыров, В. А. Ушаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: erdas@sibsau.ru

*В работе освещаются вопросы мониторинга изменения температуры поверхности воды части Тихого океана и взаимосвязи этих изменений с температурой приземного воздуха по данным дистанционного зондирования Земли из космоса.*

*Ключевые слова:* температурные изменения, космическая съемка, MODIS, водная поверхность, Тихий океан.

**TEMPERATURE CHANGES IN THE WATER SURFACE  
OF THE NORTH PACIFIC OCEAN IN THE PERIOD FROM 2005 TO 2021 ACCORDING  
TO REMOTE SENSING DATA OF THE EARTH**

Yu. P. Yuronen\*, I. R. Nasyrov, V. A. Ushakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: erdas@sibsau.ru

*The paper covers the issues of monitoring the changes in the water surface temperature of the Pacific Ocean and the relationship between these changes and surface air temperature based on remote sensing data from space.*

*Keywords:* temperature changes, space imagery, MODIS, water surface, Pacific Ocean.

На сегодняшний день существуют различные методы мониторинга изменения температур поверхностей, наиболее распространённые это непосредственные измерения температуры объектов исследования, аэро – и космическая съемка эти методы используются для анализа и прогнозирования состояния природной среды в сфере гидрометеорологии, экологии и государственных надзорных органов. Поскольку в силу того, что наземные наблюдения требуют развитой сети станций наблюдения а аэрометоды являются очень затратными, в настоящее время наиболее перспективно использовать космическую тепловую съемку, которая не только экономически более выгодна, но и захватывает обширные территории исследования. В качестве примера такого исследования можно представить северо-восточную часть Тихого океана. Целью работы является исследование температурных изменений поверхности воды, и оценка взаимосвязи этих температур с температурами атмосферы для территории северо-восточной части Тихого океана за период с 2005 по 2021 год.

Температура в водоеме является результатом нескольких, одновременно протекающих процессов, таких, как испарения, нагрев в результате воздействия солнечной радиация, теплообмен с воздушными массами, перенос тепла течением, перемешиванием вод. Она значительно стабильнее температуры воздуха, что обуславливается высокой теплоемкостью. По этой причине, даже при значительных поступлениях или потерях тепла, не происходит резких изменений температур водной поверхности. Так же температурная устойчивость обусловлена тем, что перемешиваемость вод холодных и более теплых слоев протекает достаточно медленно. Термический режим водоемов разных типов определяется их географическим положением, глубиной, особенностями циркуляции водных масс. Темпера-

тура водных масс оказывает сильно влияние на проживающих в ее толще существ, так как она является неперенным условием жизни, если другие элементы среды можно исключить из жизни организмов, то температура – никогда. Экологическое значение температуры в первую очередь проявляется через воздействие на распределение гидробионтов в водоемах и скорость протекания различных жизненных процессов, количественно связанных с температурой. В связи с этим мониторинг изменения температуры водной поверхности имеет большое значения для понимания экологической ситуации территории.

Существует множество космических аппаратов ДЗЗ, которые отличаются пространственным, временным, радиометрическим разрешением, и площадью покрытия одной сцены. Пространственное разрешение определяет возможность использования съемки при мониторинге природных объектов. В качестве источника информации возьмем космический аппарат программы MODIS.

MODIS AQUA – американский научно-исследовательский спутник, направленный на исследование Земли, предназначенный для исследования воды. AQUA – стал вторым спутником (после TERRA), запущенный в рамках программы EOS и является частью спутниковой группировки, которая включает в себя TERRA, AQUA, CloudSat, Parosoli Calips. Снимки, полученные со спутников по всему миру, являются ресурсом для проведения множества научных исследований в различных областях.

MODIS состоит из двух сканирующих спектрометров, один из которых (MODIS-N) снимает в надир, а ось съёмки другого (MODIS-T) может быть отклонена. 36 спектральных каналов MODIS охватывают диапазон с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм. Съёмка в двух зонах (0,62-0,67 и 0,841-0,876 нм) ведётся с разрешением 250 м, в пяти зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона с разрешением 500 м, а в остальных (диапазон от 0,4 до 14,4 мкм) – 1000 м. Данные MODIS, предназначенные для изучения атмосферы и океанов, хранятся в GSFC Earth Sciences Distributed Active Archive Center, для изучения суши – в USGS-NASA Land Processes DAAC. Для изучения снега и льда – в National Snow and Ice Data Center. Данные хранятся в формате HDF (Hierarchical Data Format)[2].

Для определения температуры [3] поверхности океана (SST) используется следующее уравнение:

$$SST = a_{1j} 0 + a_{1j} 1 BT_{11\mu m} + a_{1j} 2 (BT_{11\mu m} - BT_{12\mu m}) T_{sfc} + a_{1j} 3 (\sec(\theta - 1) (BT_{11\mu m} - BT_{12\mu m})) + a_{1j} 5 (\theta^*) + a_{1j} 6 (\theta^2)$$

где  $BT_{11\mu m}$  – Яркостная температура (BT) в канале 11 мкм;  $BT_{12\mu m}$  – Яркостная температура, канал 12 мкм;  $T_{sfc}$  – Переменная SST;  $\theta$  – зенитный угол датчика;  $\theta^*$  – зенитный угол сенсора делается отрицательным для пикселей в первой половине строки сканирования.

Для исследования изменения температуры водной поверхности, была определена территория (рис. 1) около города Сан-Франциско (38°30' с.ш. 125°30' з.д., 38°30' с.ш. 124° в.д., 37°30' с.ш. 124° в.д., 37°30' с.ш. 125°30' з.д.).



Рис. 1. Территория исследования

Для этой территории были подобраны из архивов данные за изучаемый период взятые с периодичностью – четыре набора данных за год по месяцам: январь, апрель, июль, октябрь. Продукт MODIS Aqua Level 3 SST Thermal IR Monthly 4km Daytime V2019.0. Для этого продукта рассчитана статистика температур и полученно средние значения (MEAN) (рис. 2), где layer 1-4 это соответственно месяца исследования: январь, апрель, июль, октябрь.

По результатам обработки всех данных становится возможным составить таблицу температур за все года исследования (таблица 1).

STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS				
Layer	MIN	MAX	MEAN	STD
1	12,3650	17,6900	15,2777	1,1199
2	13,4850	18,9850	16,0388	0,8769
3	13,2000	20,9200	18,9276	0,9981
4	15,7150	21,0350	18,9289	1,0184

Рис. 2. Значение статистических параметров за один год

Таблица 1

**Температура водной поверхности Тихого океана за период исследования**

Год	Температура водной поверхности, °С			
	январь	апрель	июль	октябрь
2005	15,2777	16,0388	18,9276	18,9289
2006	16,2465	15,8313	18,6997	18,8658
2007	14,9682	15,3257	20,0258	18,9033
2008	14,9042	14,4344	16,4897	18,9971
2009	15,5356	14,8168	18,412	18,9247
2010	16,1464	15,6858	19,2539	18,7423
2011	15,5911	15,3381	17,752	19,3555
2012	15,2162	14,852	17,1464	18,6058
2013	15,7995	15,7538	19,3123	19,3954
2014	15,8066	16,2191	20,0258	20,9313
2015	17,6081	17,0327	21,2589	21,1111
2016	16,4851	16,6785	18,5027	19,5595
2017	15,9988	16,5832	18,7496	19,3003
2018	16,2586	16,8216	18,9322	19,1916
2019	16,2303	16,1168	17,6125	19,9155
2020	15,6173	14,6141	17,8779	18,3518
2021	15,7732	15,7425	17,5741	20,9344

Помимо этого, были получены данные о температуре воздушных масс для этой же территории исследования. Для наглядности и для выявления возможных взаимосвязей между этими двумя температурами данные были сведены в один график температур (рис. 3) на котором отображены среднегодовые температуры водных поверхностей и температуры приземного воздуха на высотах высота 50 – 100 м.

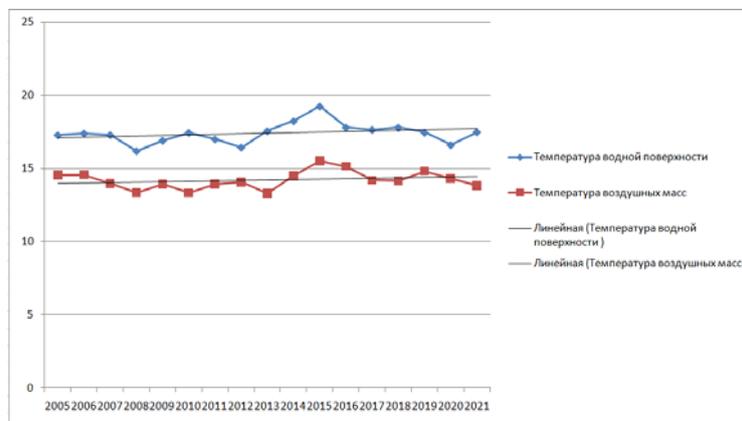


Рис. 3. Сравнение температур водной поверхности и воздушных масс

По результатам исследования на данной территории можно сделать следующие заключения:

- Температура воздушных масс по данным ДЗЗ имеет более низкую температуру, чем водная поверхность;
- В целом годовой ход значений температур коррелирован (Коэффициент корреляции равен 0,6), однако прослеживается небольшое запаздывание в повышении температуры водной массы относительно воздушных и меньшая зависимость температуры воды от колебаний температуры воздуха.
- Наблюдается общая тенденция повышения температуры как водных масс так и воздушной среды.

В результате анализа полученных данных можно сделать вывод об относительной стабильности температур в исследуемом регионе, однако замечено, что линия тренда имеет положительную тенденцию, на основе этого можно говорить, что средняя температура исследуемой области увеличивается. Методика, используемая в работе, является приемлемой для исследования изменений температур водных и приземных поверхностей. для использования данной методики необходимо учитывать, что погрешность используемого продукта ДЗЗ составляет  $\pm 0,5$  °С.

Делая заключительный вывод, можно сказать, что данные дистанционного зондирования можно использовать для решения задач по мониторингу изменения температур.

### **Библиографические ссылки**

1. USGS: Геологическая служба США: сайт. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>(дата обращения: 02.04.2023).
2. [Электронный ресурс]. – <https://terra.nasa.gov/areas/modis>(дата обращения: 03.05.2023).
3. [Электронный ресурс]. – <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod28.php>

### **References**

1. USGS: United States Geological Survey: website. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>(date of reference: 02.04.2023).
2. [Electronic resource]. – <https://terra.nasa.gov/areas/modis>(date of access: 03.05.2023).
3. [Electronic resource]. – <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod28.php>

© Юронен Ю. П., Насыров И. Р., Ушаков В. А., 2023



**Секция**

**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 336.71

## ПАКЕТЫ ФИНАНСОВОЙ ПОМОЩИ БАНКОВ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ НА ПРИМЕРЕ АВИАКОМПАНИИ ОАО «ЮТэйр»

В. М. Аврамчиков, К. И. Верхотуров, В. А. Пономарёв

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: opk11@yandex.ru

*Авиакомпания ЮТэйр занимает значимое место в выполнении как в пассажирских, так и грузовых перевозках. В связи с кризисным финансовым состоянием авиакомпания оказалась на грани банкротства, но при поддержке правительства РФ финансовое состояние компании улучшилось.*

*Ключевые слова: Авиакомпания ЮТэйр; увеличением долговой нагрузки; убыточность авиaperевозок; предотвращение дефолта; государственная финансовая поддержка.*

## FINANCIAL ASSISTANCE PACKAGES FOR BANKS IN THE RUSSIAN TRANSPORT INDUSTRY ON THE EXAMPLE OF UTAIR AIRLINES

V. M. Avramchikov, K. I. Verkhoturov, V. A. Ponomarev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: opk11@yandex.ru

*UTair Aviation occupies a significant place in both passenger and cargo transportation. Due to the financial crisis, the airline was on the verge of bankruptcy, but with the support of the Russian government, the financial condition of the company improved.*

*Keywords: UTair Aviation; an increase in debt burden; unprofitability of air transportation; default prevention; state financial support.*

**Введение.** Публичное акционерное общество авиакомпания "ЮТэйр" занимается пассажирскими и грузовыми перевозками с использованием самолетов и вертолетов. Компания осуществляет деятельность по двум направлениям: пассажирские перевозки и вертолетные работы. Направление пассажирских перевозок включает в себя регулярные и чартерные рейсы, грузовые перевозки. Компания совершает пассажирские и грузовые перевозки на внутренних и международных маршрутах с использованием различных типов самолетов. Направление вертолетных работ включает в себя монтажные работы, аэрофото- и видеосъемку лесов и авиационно-химические услуги, поисково-спасательные работы, услуги по экстренной медицинской эвакуации, аэровизуальные работы, мониторинг газо- и нефтепроводов, а также услуги по перевозке пассажиров. Компания предоставляет услуги по авиaperевозкам для миротворческих операций Организации Объединенных Наций в разных регионах мира. Компания предлагает различные авиационные услуги, в том числе услуги в аэропорту, ремонт самолетов и техническое обслуживание, а также обучение авиационного персонала [1].

**Проблема.** Как отмечено в комплексной программе развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года, утвержденной распоряжением правительства РФ от 25.06.2022г № 1693-р, развитие гражданской авиации в значительной мере зависит от динамики макроэкономических характеристик экономики страны [2]. В связи с увеличением долговой нагрузки и убыточностью пассажироперевозок в российской авиакомпании ОАО "ЮТэйр" сложилась сложная финансовая ситуация. В самой авиакомпании связывают её финансовое положение с увеличением стоимости авиационного топлива, удельный вес которого в составе себестоимости продукции оставляет свыше 30%. В связи с важностью задач, стоящих перед авиакомпанией, в том числе и социальной направ-

ленности, в правительстве РФ возникла необходимость системного решения проблемы предотвращения дефолта компании ОАО "ЮТэйр" [3]. При этом банкротство (дефолт) данного авиаперевозчика по многим причинам является самым нежелательным и неуместным способом выхода из положения, так как на рынке авиауслуг данная авиакомпания занимает значимое место в выполнении как в пассажирских, так и грузовых перевозках [4].

**Анализ ситуации и решение проблемы.** Общий долг авиакомпании перед банками составляет 56 млрд руб. Он состоит из двух синдицированных кредитов – на 15,4 млрд руб. с погашением в 2022 году и на 23,7 млрд с погашением в 2027 году, а также кредита в Сбербанке на 17,4 млрд руб. Однако на рассматриваемый период на счетах компании, по данным отчетности, находилось всего 704 млн руб., однако в связи с государственной поддержкой, финансовая ситуация меняется. На рисунке 1 показана динамика курса акций авиакомпании ОАО "ЮТэйр" с анализом в долларовом выражении, из которой видны перспективы роста ее стоимости и как следствие успех в самой отрасли [5].

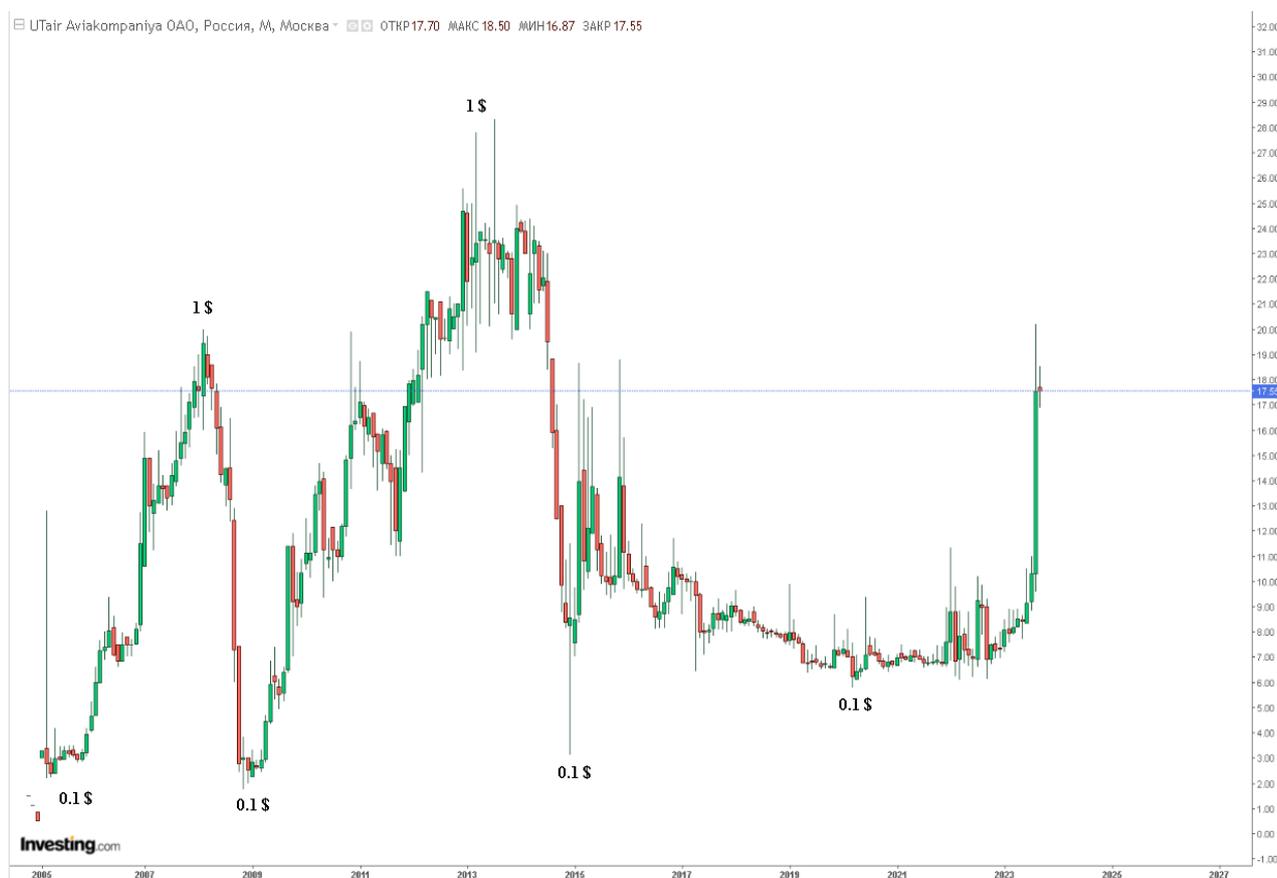


Рис. 1. Курс акций авиакомпании ПАО «ЮТэйр»  
Источник: составлено автором на основании [5]

Авиакомпания вступила переговоры с 11 банками о реструктуризации трех кредитов на 56,5 млрд руб. Долг перед ПАО Сбербанк составляет 17,4 млрд руб., из них доля в синдицированном кредите – 5 млрд руб. ОАО "Ютэйр" дважды не выплатила около 3 млрд руб. процентов по двум кредитам, в связи с чем у ПАО Сбербанк нет намерений банкротства компании. Кроме того ЮТэйр" представил план финансового оздоровления, согласованный с ПАО Сбербанк [1].

**Заключение.** Для вывода компании из сложившейся финансовой ситуации со стороны правительства РФ предполагается ввести антикризисное управление, поменять менеджмент, а также привлечь новых акционеров. На сегодняшний день контролирующим акционером ОАО "ЮТэйр" считается нефтяная компания «Сургутнефтегаз». Со стороны компании ОАО "ЮТэйр" ее руководство намерено разработать и представить новую финансовую модель для решения проблемы с долгами и сформировать положительный финансовый поток.

### Библиографические ссылки

1. Авиакомпания ЮТэйр ОАО (UTAR). [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ru.investing.com/equities/utair-aviakompaniya-oao> (Дата обращения: 08.09.2023г.).
2. Распоряжение правительства РФ от 25.06.2022г № 1693-р "О комплексной программе развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года".
3. С долгами Utair разберется правительство. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ru.investing.com/news/stock-market-news/article-599796> (Дата обращения: 08.09.2023г.).
4. Курилова А.А., Полтева Т.В. Влияние рисков российских авиакомпаний на их финансово-хозяйственную деятельность // Karelian Scientific Journal. 2017. Т. 6. № 4(21). с. 228-232.
5. Акции Utair продолжают отыгрывать новости прошлой недели. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ru.investing.com/news/stock-market-news/article-1929767> (Дата обращения: 07.09.2023г.).

### References

1. UTair OJSC (UTAR). [Electronic resource] Access mode: URL: <https://ru.investing.com/equities/utair-aviakompaniya-oao> (Date of access: 09/08/2023).
2. Decree of the Government of the Russian Federation dated June 25, 2022 No. 1693-r "On a comprehensive program for the development of the air transport industry of the Russian Federation until 2030".
3. The government will deal with Utair's debts. [Electronic resource] Access mode: URL: <https://ru.investing.com/news/stock-market-news/article-599796> (Date of access: 09/08/2023).
4. Kurilova A.A., Polteva T.V. Influence of risks of Russian airlines on their financial and economic activities // Karelian Scientific Journal. 2017. V. 6. No. 4(21). With. 228-232.
5. Utair shares continue to win back last week's news. [Electronic resource] Access mode: URL: <https://ru.investing.com/news/stock-market-news/article-1929767> (Date of access: 09/07/2023).

© Аврамчиков В. М., Верхотуров К. И., Пономарёв В. А., 2023

УДК 629.73

**АНАЛИЗ ЗАМЕНЫ АЭРОДРОМНОГО ТРАНСПОРТА  
С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ МАШИНАМИ  
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГЕ**

Е. А. Ачкасова, А. А. Семичев, О. Г. Бойко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: furmula@mail.ru

*В статье рассмотрены возможности, достоинства и недостатки замены средств наземного обеспечения полетов, машинами на электрической тяге, на примере аэропорта им. Дм. Хворостовского.*

*Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, техническое обслуживание, электрическая тяга.*

**ANALYSIS OF REPLACEMENT OF AIRPORT TRANSPORT  
WITH INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY ELECTRIC VEHICLES**

E. A. Achkasova, A. A. Semichev, O. G. Boyko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: furmula@mail.ru

*The article discusses the possibilities, advantages and disadvantages of replacing ground flight support equipment with electric vehicles, using the example of the airport named after. Dm. Hvorostovsky.*

*Keywords: internal combustion engine, maintenance, electric traction.*

Международный аэропорт Красноярска им. Дм. Хворостовского (ООО аэропорт «Емельяново») – один из важнейших авиатранспортных узлов региона, играющий огромную роль в развитии торгово-экономических связей Красноярского края. Необходимость поддержания парка средств наземного обеспечения полётов (СНОП) на уровне, соответствующем уровню развития авиационной техники (АТ) и авиационных перевозок, является актуальной задачей для обеспечения безопасности полетов, экономической эффективности и совершенствования процессов технического обслуживания (ТО).

Целью данной работы является анализ перспектив замены базы средств наземного обеспечения полётов аэропорта Емельяново, использующих двигатель внутреннего сгорания, машинами на электрической тяге для повышения экономической эффективности процесса обслуживания воздушных судов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- Выполнен анализ несовершенств средств наземного обеспечения полётов, использующих двигатель внутреннего сгорания.
- Выполнен анализ особенностей замены средств наземного обеспечения полётов, машинами на электрической тяге.
- Проведена оценка экономической целесообразности замены техникой на базе электромобиля.

С увеличением объемов авиаперевозок и введением в эксплуатацию новой АТ, увеличивается объем работ по техническому обслуживанию и подготовке АТ к полету. Соответственно остаётся актуальным вопрос механизации и автоматизации процессов технического обслуживания и подготовки к полетам. В настоящее время применяется большое число различных видов машин, механизмов и

оборудования применяемого при выполнении технического обслуживания АТ. Для каждого процесса технического обслуживания предусмотрены специальные средства механизации.

В автопарке авиапредприятия ООО «Аэропорт Емельяново» насчитывается более 80 различных автомобилей и средств наземного обеспечения полётов [1]. Из анализа парка СНОП следует, что большая часть спецтехники – иностранного производства. Вся техника оснащена двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Также, следует отметить, что часть автомобилей имеют возраст старше 25 лет.

В результате анализа характеристик спецтехники и особенностей её эксплуатации отмечено, что СНОП на базе ДВС, содержат ряд эксплуатационных недостатков. Среди них:

- а) Трудоёмкое техническое обслуживание;
- б) Обеспечение рабочей температуры двигателя внутреннего сгорания;
- в) Быстрое остывание дизельных двигателей внутреннего сгорания в холодное время года;
- г) Короткий промежуток между формами технического обслуживания самой техники.

Такая техника требует к себе особого внимания. Количество и трудоёмкость работ при ТО техники приводит к снижению времени её использования по назначению и возможным задержкам или отменам рейсов. Обновление парка СНОП, в принципе позволяет минимизировать задержки при ТО АТ, однако, достичь наибольшей производительности позволит внедрение в СНОП на базе электромобилей.

Электромобили имеют ряд важных преимуществ перед авто с ДВС. Рассмотрим основные:

- Дешевизна электроэнергии;
- Проще механическая часть, меньше движущихся и трущихся частей в основных узлах;
- Электродвигатель не требует прогрева и поддержания рабочей температуры;
- Электромобили тихие и не создают вибраций при работе.

Электромобиль требует значительно меньшее количество работ при ТО и имеет большие промежутки между формами периодического ТО. Ежедневное ТО ограничивается визуальным осмотром и контролем показаний бортового компьютера.

Основными недостатками электротранспорта можно считать:

- Ограниченный пробег.
- Долгая зарядка.
- Отсутствие повсеместной зарядной инфраструктуры.
- Применение компонентов иностранного производства.

Проблемы электромобилей, на сегодняшний день, уже решаются. Так, 23 августа 2021 года Правительством Российской Федерации утверждена концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года [2]. Концепция предполагает развитие собственного производства электротранспорта и его компонентов, создание необходимой инфраструктуры и помощь в интеграции электромобилей в различные отрасли хозяйства.

Исходя из проведённого анализа, в работе предложен первый тестовый автомобиль парка СНОП для замены его электромобилем – азотозаправщик на базе шасси Зил-131. Для его замены, в качестве базы, использован электромобиль Газель e-NN, электрический вариант автомобиля Газель NN [3].

В работе рассмотрена возможность установки оборудования азотозаправщика на шасси электромобилей Газель e-NN (рис. 1). Технические характеристики электромобилей уступают характеристикам заменяемого автомобиля с ДВС. Однако, азотозаправщик УГЗС.М разрабатывался как техника двойного назначения. В результате, машина обладает повышенными эксплуатационными показателями. Азотозаправщик УГЗС.М оснащён специальным кузовом с двумя отсеками: баллонный и компрессорный.

Грузоподъёмность нового шасси позволит разместить всё оборудование вместе с кузовом без изменений. Габариты обновлённого азотозаправщика уменьшатся по сравнению с УГЗС.М на базе ЗИЛ-131. Это положительно скажется на маневренности техники и облегчит подъезд к АТ для осуществления её обслуживания.

Конструкцию электромобилей Газель e-NN можно условно разделить на традиционную часть и электрическую [4]. В основе электромобилей заложен автомобиль Газель NN, исключая силовую установку. От своего предшественника с ДВС электромобиль заимствовал ходовую часть, трансмиссию, кабину и механизмы управления. Изменениям будут подвергнуты ходовая часть и механизмы управления. В ходовой части следует усилить подвеску и раму для установки тяговой батареи. Механизмы

управления необходимо оснастить электронасосом гидроусилителя руля и вакуумным насосом усилителя тормозов с ресивером. Систему отопления кабины водителя оборудовать дизельным отопителем, для экономии заряда батареи.

Электрическая часть Газель e- NN состоит из блока управления, блока контроля изоляции, зарядного порта, стойки с зарядным устройством, преобразователем напряжения, с распределительными коробками и контроллером быстрой зарядки, распределительных коробок с предохранителями, тяговой батареи, инвертора, электродвигателя с редуктором.

Большая часть работ по техническому обслуживанию электромобиля связана с его механической, базовой частью. Никаких сложностей у штатных механиков службы спецтранспорта аэропорта с ними не возникнет. Для обслуживания электрических агрегатов, обслуживание которых требует определенных навыков, может потребоваться обучение персонала и закупка специального оборудования и инструмента.

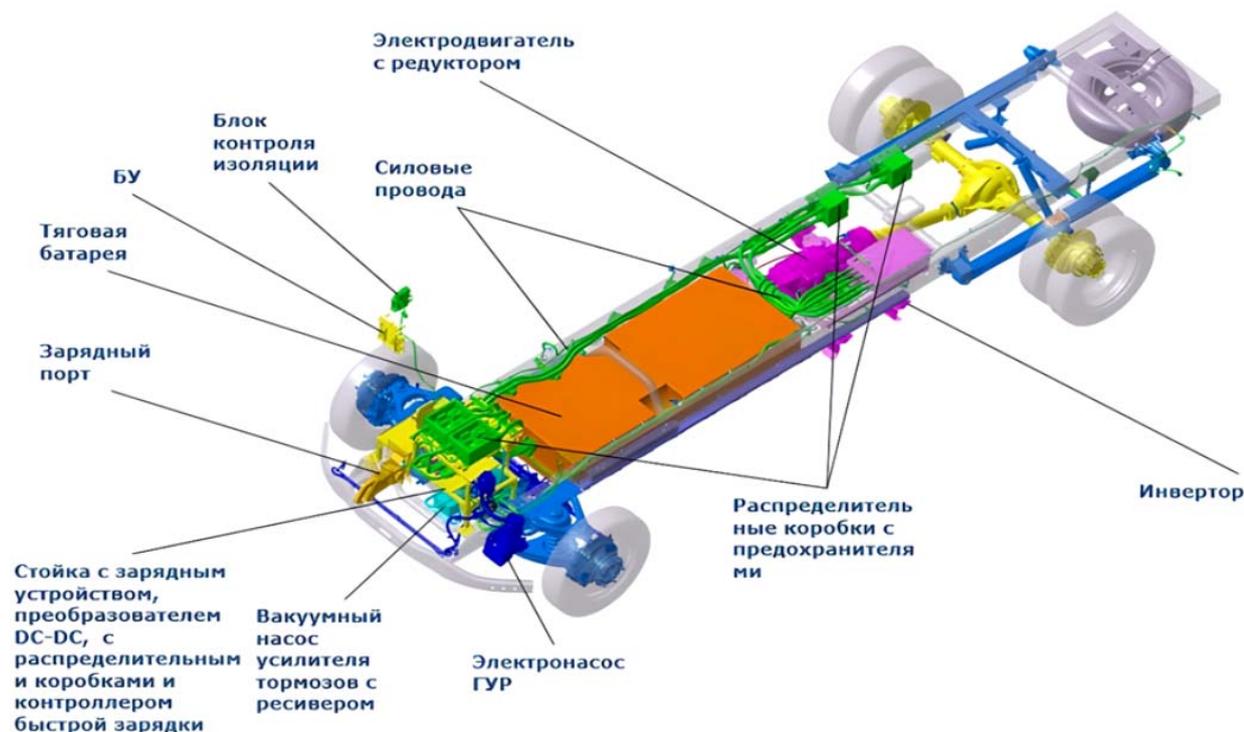


Рис. 1. Компоновка электрических агрегатов электромобиля Газель e-NN

В работе рассмотрено, как изменится эффективность эксплуатации азотозаправщика УГЗС.М при замене его шасси ЗИЛ-131 на шасси Газель e-NN.

Азотозаправщик проходит ежедневное ТО в службе спецтранспорта аэропорта. Построив маршруты движения автомобиля, рассчитан возможный суммарный пробег азотозаправщика за сутки, который составляет 16,1 км.

Выполнен расчёт стоимости суточного пробега автомобиля и электромобиля. Стоимость суточного пробега автомобиля ЗИЛ-131 составляет 656,88 рублей, электромобиля Газель e-NN – 67,62 рубля. Стоимость суточного пробега электромобиля в 10 раз меньше этого же показателя автомобиля. Эксплуатационные показатели электромобиля Газель e-NN., позволяют заменить традиционный автомобиль и работать, выполняя все требуемые функции, экономическая эффективность эксплуатации электромобиля выше, чем у автомобиля с двигателем внутреннего сгорания.

Таким образом, при обновлении автопарка аэропорта, службе спецтранспорта, целесообразно рассмотреть вариант внедрения электромобилей.

Дальнейшее развитие производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации повысит уровень доступности электромобилей, их комплектующих и инфраструктуры. Это позволит комплексно внедрять электромобили во все сферы повседневной жизни.

### Библиографические ссылки

1. Международный аэропорт Красноярск: официальный сайт. URL: <https://www.kja.aero/> (дата обращения 01.09.2023).
2. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р : Москва, 2021. 41 с.
3. Автомобиль Газель NN. Руководство по эксплуатации. Второе издание / утв.: П. И. Максимов; ООО «Автозавод ГАЗ» Нижний Новгород, 2021. 242 с.
4. Электромобили Газель e-NN / Автоцентр ГАЗ Автоград : официальный сайт. Калининград, 2023 URL: <https://gaz.avtograd39.ru/models/electroGazelle/> (дата обращения 01.09.2023).

### References

1. *Mezhdunarodnyj aeroport Krasnoyarsk* [Krasnoyarsk International Airport] Available at: <https://www.kja.aero/> (accessed 01.09.2023). (InRuss.)
2. *Koncepciya po razvitiyu proizvodstva i ispol'zovaniya elektricheskogo avtomobil'nogo transporta v Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda : utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 23 avgusta 2021 g* [Concept for the development of production and use of electric road transport in the Russian Federation for the period until 2030: approved by order of the Government of the Russian Federation dated August 23, 2021] № 2290-р : Moscow, 2021. 41 p. (InRuss.)
3. P. I. Maksimov. *Avtomobil' Gazel' NN. Rukovodstvo po ekspluatacii* [Car Gazelle NN. Manual]. Second edition. Nizhny Novgorod, 2021. 242 p. (InRuss.)
4. *Elektromobili Gazel' e-NN* [Electric cars Gazelle e-NN] Available at: <https://gaz.avtograd39.ru/models/electroGazelle/> (accessed 01.09.2023). (InRuss.)

© Ачкасова Е. А., Семичев А. А., Бойко О. Г., 2023

УДК 629.7.017.1

## ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БПЛА ПРИ НИЗКОВОСОТНОМ И ДИСПЕРСНОМ РАСПЫЛЕНИИ

М. Г. Елизарьева, К. П. Шатных

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: elizarevamg@sibsau.ru

*В работе рассмотрена конструкция вихревого движителя с эффектом Магнуса. Представлена модель беспилотного летательного аппарата с ультрамалообъемной системой опрыскивания для сельского хозяйства, а также основные эксплуатационные характеристики.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, циклолет, эффект Магнуса, система опрыскивания, сельскохозяйственный, конструкция, вихревой движитель.*

## FEATURES OF UAV OPERATION AT LOW ALTITUDE AND FINE SPRAY

M. G. Elizareva, K. P. Shatnykh

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: vamg@sibsau.ru

*The work examines the design of a vortex propulsion device with the Magnus effect. A model of an unmanned aerial vehicle with an ultra-low-volume spraying system for agriculture is presented, as well as the main operational characteristics.*

*Keywords: unmanned aerial vehicle, cyclolet, Magnus effect, spraying system, agricultural, design, vortex propulsion, rotor.*

В мире и в России полным ходом идет создания новых типов БПЛА, особенно актуально создание новых движителей для беспилотных ЛА. Такой движитель получил название – цилиндрический. Цилиндрический движитель имеет ряд преимуществ перед традиционными движителями:

- Низкий уровень шума
- Компактность конструкции
- Не сложное обслуживание
- Возможность применять направление тяги на 360 градусов.

В России актуально использование сельскохозяйственных БПЛА, ведь страна имеет большую посевную площадь. За последние 6 лет машиностроительные предприятия сделали БПЛА сельскохозяйственного назначения больше, чем за все предыдущее годы. Такой интерес связан с большими перспективами и разнообразными конструкторскими решениями [1].

Актуальность данной работы заключается в то, что поиск новых БПЛА с новым движителем с использованием эффекта Магнуса для применение в сельском хозяйстве, упрощит обслуживание нынешних сельскохозяйственных БПЛА, обладающих сложной конструкцией и дорогостоящим обслуживанием [2].

В настоящее время с 2021 г., через межфакультетский учебно – исследовательский центр авиационных исследований студентов (АИСТ) СибГУ (далее УИЦ АИСТ) ведется проект по разработке беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на основе эффекта Магнуса с крыльчато – лопастным движителем [3], [4]. На созданной модели БПЛА с цилиндрическим – вихревым движителем с регулируемыми лопатками будет устанавливаться устройство с ультрамалообъемным опрыскиванием (опрыскивающий модуль). Данный движитель с эффектом Магнуса может являться одновременно и распылителем, что значительно упрощает эксплуатацию БПЛА, не нуждающейся в отдельной системе опрыскивания, которая увеличивает полезную нагрузку на БПЛА и уменьшает время полёта. Его применение в сельском хозяйстве упрощит использование более сложных и дорогих БПЛА для сельскохозяйственных угодий.

Преимущества использования БПЛА с ультрамалообъемным опрыскиванием при обработке дачных или малых участков: легкость в эксплуатации, снижение производственных расходов фермера, распыление удобрений и инсектицидов, картографирование, профилактика нашествия животных и насекомых, оценка качества урожая.

Проект устройства с опрыскивающей системой представлен на рисунке 1.

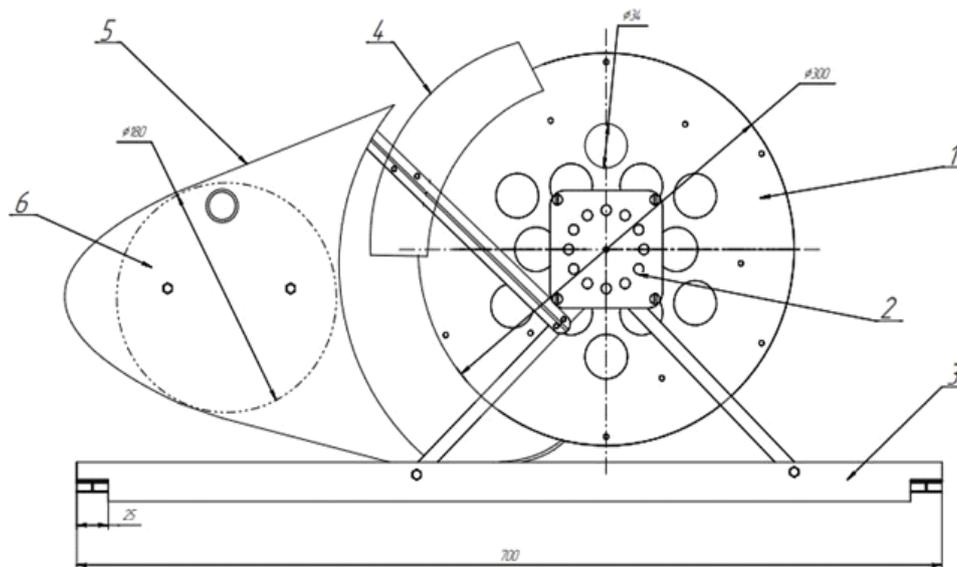


Рис. 1. Экспериментальный проект БПЛА с ЦВД-23 с опрыскивающей системой, вид с боку:

1 – ротор; 2 – бесколлекторный двигатель постоянного тока; 3 – рама; 4 – кофюзор; 5 – обечайка; 6 – опрыскивающий модуль

Способ ультрамалообъемного внесения системы защиты растений (СЗР) при обработке сельскохозяйственных растений с применением предлагаемого устройства заключается в следующем (рис. 2). В емкость заливают рабочую жидкость через заправочную горловину 3. Размеры модуля и его комплектующих могут изменяться и зависят от грузоподъемности БПЛА. В нашем случае проект подразумевает объем бака около 5 литров.

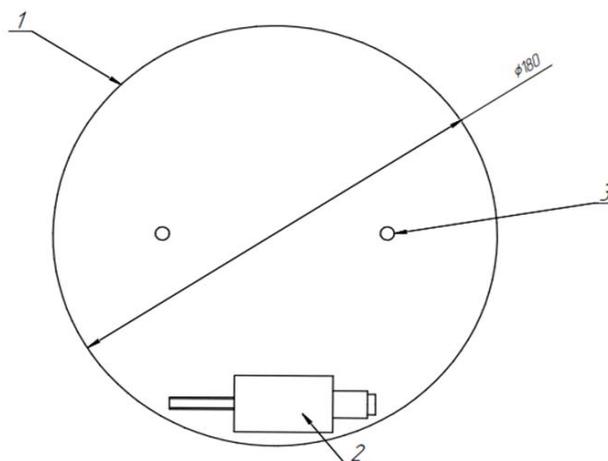


Рис. 2. Устройство для ультрамалообъемного внесения СЗР, вид сбоку

1 – корпус бака; 2 – устройство подачи жидкости в трубку; 3 – отверстия для крепления

Опрыскивающий модуль будет закрепляться на БПЛА с помощью 4 винтов по бокам к обечайке с внутренней стороны, который прикрученный к основной раме БПЛА.

В вале ЦВД будет установлена дозирующая форсунка жидкость из которой будет подаваться прямо в ротор (барабан) БПЛА. За счет чего реагент будет разбрызгиваться на объект обработки вентиляторным способом. При установке пневмоаккумулятора и пневморедуктора диапазон давлений выбирается в зависимости от поставленных перед опрыскивающим модулем задач и составляет обычно от 4 до 12 бар.

Данное устройство позволяет реализовать способ ультрамалообъемного [5] опрыскивания растений без их повреждения и вреда для человека. Точечно обработать труднодоступные участки поля с целью ликвидации локальных очагов поражения культур болезнями или вредителями, что приводит к существенной экономии дорогостоящих рабочих растворов, снижает вредное экологическое воздействие химических препаратов на почву, исключает излишнее уплотнение почвы, неизбежно возникающее при использовании традиционных технологий.

Выбор беспилотных авиационных средств (БАС) для БПЛА с цилиндрическим движителем в качестве носителя устройства в рамках реализации способа дифференцированного и точного внесения СЗР на локализованный участок был основан на анализе показателей уровня конкурентоспособности с учетом потребительских свойств и тактико-технических характеристик летательного аппарата.

### Библиографические ссылки

1. Применение сельскохозяйственного беспилотного летательного аппарата для обработки сельскохозяйственных культур / Д.В. Кудрявцев, А.Г. Магдин, А.А. Горбунов, Р.А. Нестеренко, Д.К. Жанзакова // Аэрокосмический Институт Оренбургского Государственного Университета. Агротехника и энергообеспечение. 2021-№2(31) Текст: непосредственный.
2. Цилиндрический крыльчато-лопастной движитель на основе эффекта Магнуса / Г. Д. Коваленко, М. Г. Елизарьева // Современные научные исследования: Актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2022. С. 346. Текст. Изображение: электронные.
3. Анализ применения БПЛА для сельскохозяйственной обработки / К.П. Шатных, М.Г. Елизарьева, Г.Д. Коваленко //Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–11 ноября 2022, г. Красноярск), С. 73
4. Техничко-эксплуатационные характеристики цилиндрического движителя беспилотного летательного аппарата / М. Г. Елизарьева, М. А. Смирнов Научный руководитель Г. Д. Коваленко // IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», посвящённой ко Дню космонавтики 14.04.2023 Текст. Изображение: электронные.
5. Использование ультрамалообъемного опрыскивателя при обработке садов и виноградников / Г. Г. Маслов, С. М. Борисова, Н. В. Малашихин // Научный журнал КубГАУ, 2019 года №149(05) Текст: непосредственный.

### References

1. Application of an agricultural unmanned aerial vehicle for processing agricultural crops / D.V. Kudryavtsev, A.G. Magdin, A.A. Gorbunov, R.A. Nesterenko, D.K. Zhanzakova // Aerospace Institute of Orenburg State University. Agricultural technology and energy supply. 2021-№2(31) Text: direct.
2. Cylindrical wing-blade propulsion based on the Magnus effect / G. D. Kovalenko, M. G. Elizaryeva // Modern scientific research: Current issues, achievements and innovations: collection of articles of the XXIII International Scientific and Practical Conference. Penza: ICNS “Science and Enlightenment”. 2022. P. 346. Text. Image: electronic.
3. Analysis of the use of UAVs for agricultural processing / K.P. Shatnykh, M.G. Elirazyeva, G.D. Kovalenko // Materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems, Academician M. F. Reshetnev (November 09–11, 2022, Krasnoyarsk), P. 73
4. Technical and operational characteristics of the cylindrical propulsion unit of an unmanned aerial vehicle / M. G. Elizaryeva, M. A. Smirnov Scientific supervisor G. D. Kovalenko // IX International Scientific and Practical Conference “Current Problems of Aviation and Cosmonautics”, dedicated to the Day cosmonautics 04/14/2023 Text. Image: electronic.
5. The use of an ultra-low-volume sprayer when processing orchards and vineyards / G. G. Maslov, S. M. Borisova, N. V. Malashikhin // Scientific journal of KubSAU, 2019 No. 149 (05) Text: direct.

УДК 681.586.728

## ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕРКОНОВОГО ДАТЧИКА

М. Г. Елизарьева, В. Ф. Бадыгов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: elizarevamg@sibsau.ru

*Работа любой электроаппаратуры основана на действии контактов – тех поверхностей, которые замыкают и размыкают цепь. Герконовый датчик замыкает или размыкает сети при воздействии на него электромагнитного поля. Экспериментальным путем проводится сравнение герконовых датчиков для дальнейшего исследования и возможности использования их для определения, изменяющегося во времени поля от моторов (в том числе авиационных) и трансформаторов.*

*Ключевые слова: герконовый датчик, магнит, магнитное поле, электрическая цепь, цифровой сигнал, светодиодный индикатор.*

## MAGNETIC FIELD MEASUREMENT USING REED SENSOR

M. G. Elizareva, V. F. Badygov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: elizarevamg@sibsau.ru

*The operation of any electrical equipment is based on the action of contacts – those surfaces that close and open the circuit. The reed sensor closes or opens the network when exposed to an electromagnetic field. An experimental comparison of reed sensors is carried out for further research and the possibility of using them to determine the time-varying field from motors (including aircraft) and transformers.*

*Keywords: reed sensor, magnet, magnetic field, electrical circuit, digital signal, LED indicator.*

Геркон (герметизированный контакт) представляет собой стеклянную колбочку, внутри которой находятся две упругие контактные ферромагнитные пластины, которые при погружении в магнитное поле смыкаются и образуется контакт, по которому затем течёт ток [1]. Колбочка при этом обычно заполнена инертным газом или в ней содержится вакуум. Для работы не требует питания, в отличие от интегральной схемы. В результате ключ в герконе обладает высокой надежностью, поскольку он не подвержен влиянию влаги или других факторов окружающей среды. Поэтому контакты не будут окисляться и с нагрузками логического уровня будут продолжать работать в течение миллионов циклов [2].

Поле создаётся постоянным или электрическим магнитом. От напряжения магнитного потока зависит положение контактов. Попадая в поле действия силовой линии, внутренние контакты устройства намагничиваются и притягиваются под действием, преодолевающим силу упругости. Происходит замыкание цепи.

Принцип работы герконового датчика показан на рисунке 1.

Преимуществом использования герконовых датчиков являются: долговечность использования из-за отсутствия трения; малый размер; способность коммутировать сигналы очень малой мощности; отсутствие вносимого шума и искажения сигнала; высокое быстродействие по сравнению с электро-механическими реле[3].

Недостатками являются: больший вес по сравнению с открытыми контактами; восприимчивость к внешним магнитным полям (для защиты применяются магнитные экраны); хрупкость, Герконы нель-

зя использовать в условиях сильных вибраций и ударных нагрузок; возможность самопроизвольного размыкания контактов геркона при больших токах (в результате износа нормально разомкнутые контакты геркона могут «залипать», не размыкаться при выводе из магнитного поля).

Основное применение герконов – системы безопасности и автоматики (например, датчики открытия двери, позиционирования кабины лифта, верхней крышки ноутбука). Подводное оборудование (фонари для дайвинга и подводной охоты). Тестовое и измерительное оборудование (например, в схемах электрических счётчиков и велокомпьютеров). Медицинская и телекоммуникационная аппаратура. Герконы используются как датчики положения, концевые выключатели и т. д. [4]

В данной статье экспериментальным путем выберем из двух исследуемых герконовых датчиков наиболее удовлетворяющий нашим параметрам. Для эксперимента нами были взяты цифровые модули: модуль KY-021 и модуль KY-025, оснащенные герконом, для Arduino. Модуль мини-герконового переключателя KY-021 состоит из резистора 10 кОм и небольшого геркона, который приводится в действие магнитным полем (рис. 2).

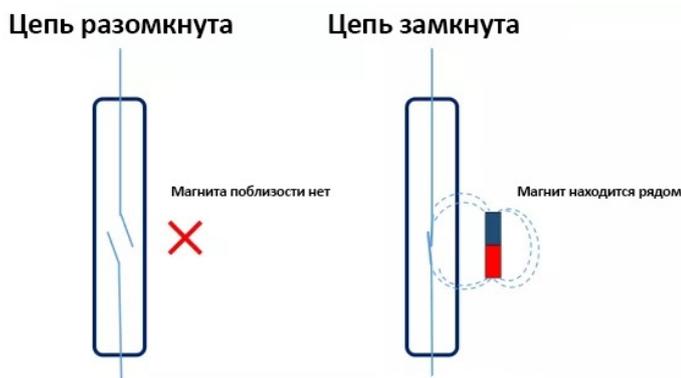


Рис. 1. Принцип работы герконового датчика

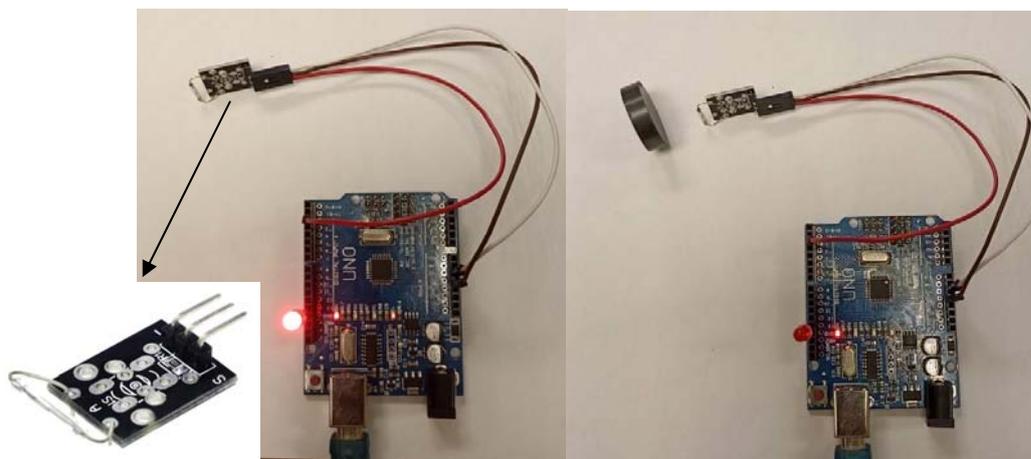


Рис. 2. Модуль KY-021 при отсутствии магнита и его использовании

При обнаружении магнитного поля светодиод гаснет полярность магнита не имеет значения.

На модуле KY-025 установлены компаратор, подстроечный резистор и пару светодиодов. Один светодиод горит, когда на модуль подаётся питание, другой – когда геркон попадает в магнитное поле. Датчик магнитного поля KY-025 имеет два выхода: один цифровой, другой – аналоговый. Их можно использовать как одновременно, так и по отдельности. Цифровой выход выдаёт логический 0 если магнитного поля нет и логическую 1, если к геркону поднести магнит. А на аналоговом выходе в

случаи наличия магнитного поля напряжение стремится к нулю, а при его отсутствии – к 5В (1023). Аналоговый выход можно настроить подстроечным резистором (рис. 3) [5].

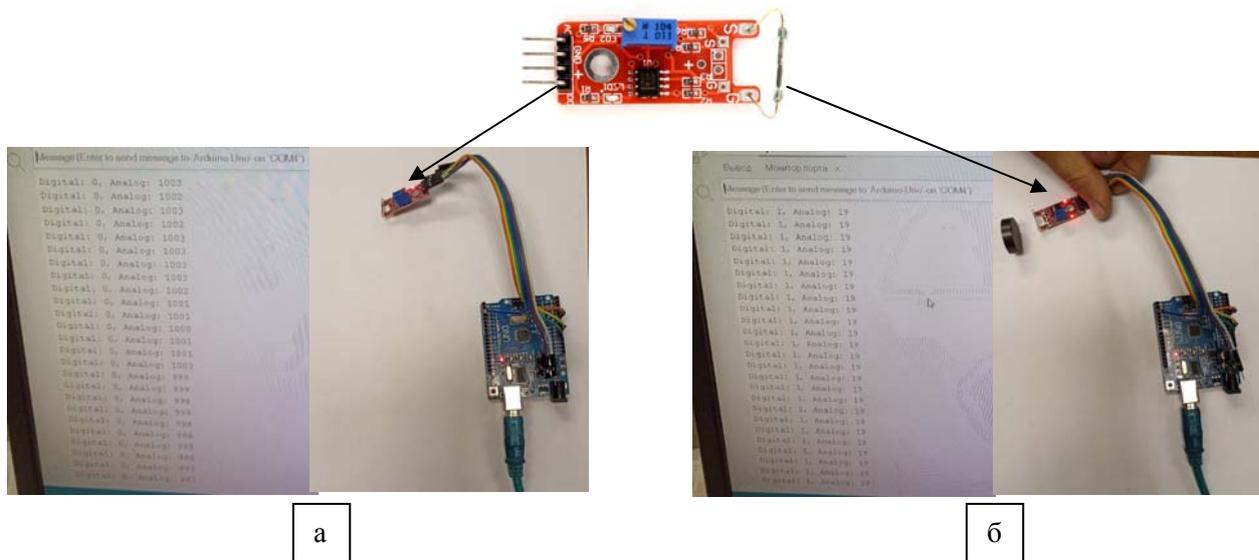


Рис. 3. Работа модуль KY-025 при отсутствии (а) и присутствии магнитного поля (б)

По итогам проведения эксперимента мы смогли достоверно определить наличие или отсутствие магнитного поля, количественные показатели магнитного поля не достоверны.

Для дальнейших исследований выбираем модуль KY-025, т.к. он удовлетворяет необходимым нам параметрам.

#### Библиографические ссылки

1. Гуревич В. И. Высоковольтные устройства автоматики на герконах, 2000, Хайфа, 368 с: ил.
2. Электромеханические аппараты автоматики: Учебник для вузов по спец. «Электрич. Аппараты»/ Буль Б.К., Буль О.Б., Азанов В.А., Шоффа В.Н.// М: Высш. шк., 1988. 303 с.: ил.
3. Проектирование электрических аппаратов: Учебник для вузов/Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др.; Под ред. Г. Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 540 с.
4. URL: <https://strojdvor.ru/elektrosnabzhenie/princip-raboty-i-texnicheskie-xarakteristiki-gerkonovyx-datchikov/>
5. URL: <https://shemi.ru/datchiki-magnitnyh-polej/>

#### References

1. Gurevich V.I. High-voltage automation devices on reed switches, 2000, Haifa, 368 p.: ill.
2. Electromechanical automation devices: Textbook for universities on special topics. "Electric Apparatuses"/ Bul B.K., Bul O.B., Azanov V.A., Shoffa V.N.// M: Higher. school, 1988. 303 pp.: ill.
3. Design of electrical devices: Textbook for universities/G. N. Alexandrov, V.V. Borisov, G.S. Kaplan and others; Ed. G. N. Alexandrova. 2nd ed., revised. and additional St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State Technical University, 2000. 540 p.
4. URL: <https://strojdvor.ru/elektrosnabzhenie/princip-raboty-i-texnicheskie-xarakteristiki-gerkonovyx-datchikov/>
5. URL: <https://shemi.ru/datchiki-magnitnyh-polej/>

© Елизарьева М. Г., Бадыгов В. Ф., 2023

УДК 681.586.728

## СРАВНЕНИЕ ДАТЧИКОВ НА ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА И ГЕРКОНОВЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

М. Г. Елизарьева, В. Ф. Бадыгов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: elizarevamg@sibsau.ru

*В данной работе приведен сравнительный анализ датчиков тока на основе эффекта Холла и герконового. Рассмотрены достоинства и недостатки данных типов датчиков. Сделаны выводы о применении данных датчиков для дальнейших исследований.*

*Ключевые слова: герконовый датчик, датчик Холла, магнит, магнитное поле, электрическая цепь, цифровой сигнал.*

## COMPARISON OF HALL EFFECT AND REED SENSORS WHEN MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELD

M.G. Elizareva, V.F. Badygov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: elizarevamg@sibsau.ru

*This paper provides a comparative analysis of current sensors based on the Hall effect and reed switch. The advantages and disadvantages of these types of sensors are considered. Conclusions are drawn about the use of these sensors for further research.*

*Keywords: reed sensor, Hall Sensor, magnet, magnetic field, electrical circuit, digital signal.*

На современном этапе развития электроэнергетики при повсеместном использовании электрооборудования и электроприборов наиболее актуальным является достоверное измерение силы тока для обеспечения высокой надежности и безопасности промышленных систем и сетей [1]. Магнитные бесконтактные датчики используются для определения и измерения уровня жидкости, расстояния, перемещения, положения, частоты вращения. По принципу действия магнитные датчики можно разделить на две группы: герконовые и электронные (на основе магниторезистивного эффекта и эффекта Холла).

Основой герконовых магнитных датчиков являются герконовые переключатели – ферромагнитные контакты (герконы), герметично запаянные в стеклянной колбе, обеспечивающей защиту и изоляцию контактов и заполненной инертным газом. Приближение магнитного поля (например, постоянного магнита на поршне цилиндра) приводит к изменению электрического сигнала и переключению контактов. Существует два основных типа герконовых переключателей – нормально разомкнутые и нормально замкнутые.

Основные преимущества герконовых магнитных датчиков: простая и надежная конструкция и монтаж; бесконтактный принцип действия – отсутствие износа, не требуется обслуживание; возможность создания различных вариантов конструкций с применением одного и того же чувствительного элемента; использование в жестких условиях (загрязнения, влага) – чувствительный элемент и магнит изолированы от прямого воздействия агрессивных факторов. Герконы более чувствительны к изменению магнитного поля. Герконовые датчики не восприимчивы к электростатическому разряду, который часто может серьезно повредить устройства с эффектом Холла. Способны выдерживать большие напряжения (самые миниатюрные рассчитаны на напряжение до 1000 вольт). Устройствам на эффекте Холла требуется дополнительная схема защиты от перенапряжения для номиналов свыше 100 вольт.

К недостаткам герконовых датчиков можно отнести чувствительность к паразитным магнитным полям и возможность реализации только логики "включено-выключено" без определения промежуточных значений или измерений величин [2].

На рисунке 1 представлен герконовый датчик КУ-025 в процессе эксперимента с обнаружением магнитного поля.

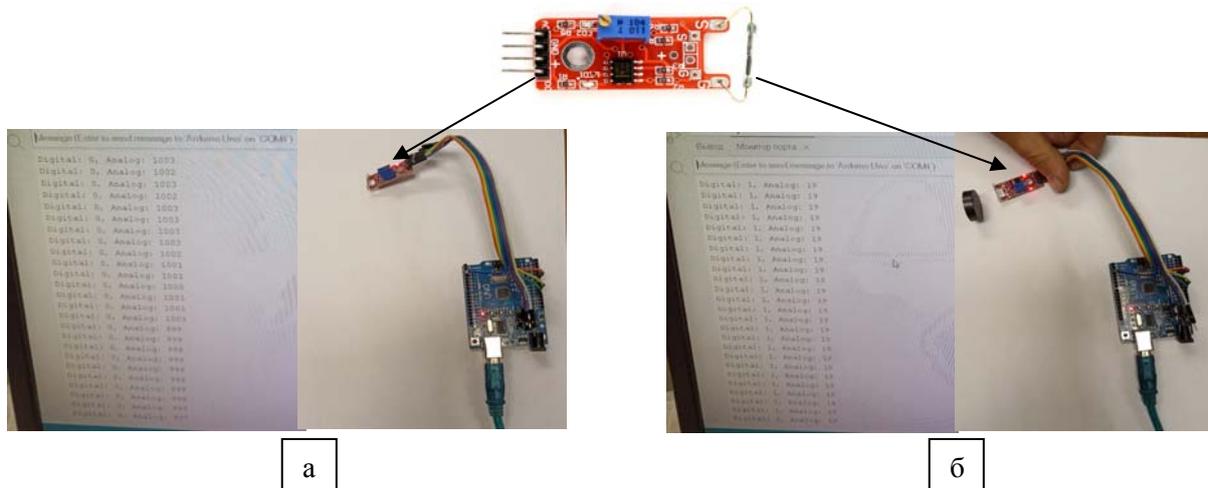


Рис. 1. Работа герконового датчика КУ-025 при отсутствии (а) и присутствии магнитного поля (б)

Датчики на эффекте Холла основаны на явлении возникновения поперечной разности потенциалов в полупроводнике, по которому протекает электрический ток и существует магнитное поле, перпендикулярное направлению тока. Датчик Холла – датчик магнитного поля. В отличие от геркона, имеет непрерывную характеристику сигнала в зависимости от величины магнитного поля.

Преимуществами магнитных датчиков на эффекте Холла являются практически неограниченный ресурс из-за отсутствия механических контактов, высокая частота коммутации (до 20 кГц и более) и возможность реализации измерений разных видов, например, подсчет количества зубьев или изделий из ферромагнитных материалов. В отличие от геркона, устройство на основе эффекта Холла содержит в себе активную схему, поэтому оно потребляет небольшое количество тока в любое время. Цифровые датчики Холла обеспечивают высокую надежность и для точных требований к измерениям могут быть запрограммированы на активацию при заданной величине магнитного поля [3].

Датчик тока на основе эффекта Холла обладает рядом преимуществ, которые заключаются в возможности измерения как постоянных, так и переменных токов, и малых размерах. К их главным достоинствам следует отнести отсутствие вносимых с систему потерь мощности, широкий диапазон частот.

По сравнению с герконом датчик Холла имеет такой недостаток как высокое энергопотребление, что делает невозможным работу от встроенной батарейки. Недостатком также является необходимость внешнего источника питания и зависимость от температуры [4].

На рисунке 2 представлен датчик Холла АН3503 во время проводимого эксперимента по обнаружению и фиксации значений магнитного поля [5].

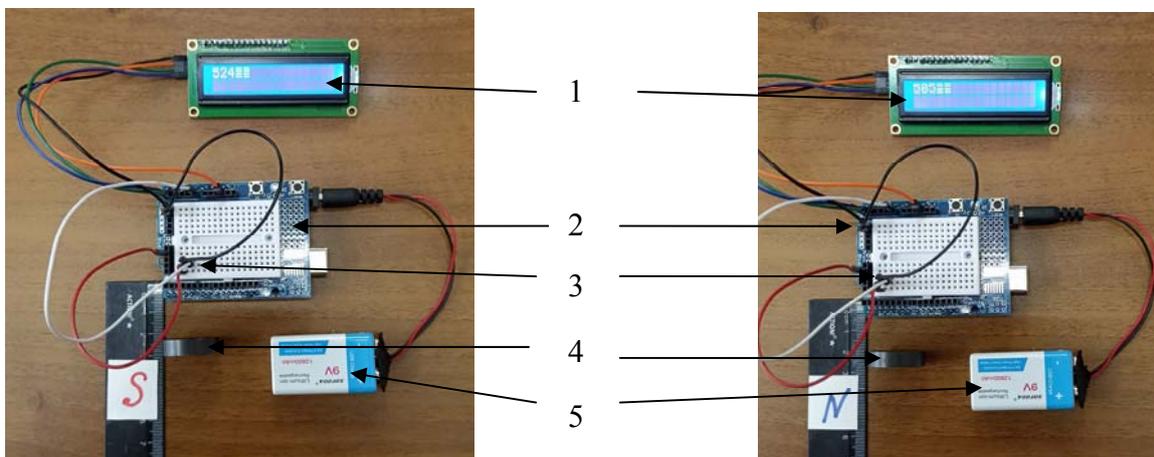


Рис. 2 Магнитометр с датчиком Холла АН3503:  
 1 – LCD 1602 дисплей; 2 – контроллер Arduino Uno, построен на ATmega328;  
 3 – датчик; 4 – магнит; 5 – внешний блок питания

Опираясь на вышеперечисленные сравнения и на проведенные ранее исследования с обнаружением магнитного поля с помощью герконовых датчиков и датчиков на эффекте Холла установлено, что и датчик Холла и герконовый датчик могут определить наличие поля, а датчик Холла может также определять качественные показатели. Для дальнейших исследований и в зависимости от необходимых условий мы будем применять как герконовый датчик, так и датчик Холла для определения, изменяющегося во времени поля от моторов и трансформаторов.

### Библиографические ссылки

1. Клименко, К. А. Сравнительный анализ современных датчиков тока / К. А. Клименко. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2011. № 8 (31). Т. 1. С. 66-68. URL: <https://moluch.ru/archive/31/3552/> (дата обращения: 15.09.2023).
2. Голощапов А. Магнитные бесконтактные датчики, герконовые реле и переключатели // Электроника НТБ научно-технический журнал. Выпуск №9. 2016.
3. <https://formpost.pro/2020/10/22/standex-electronics-герконовые-датчики-в-сравнении-с-д/>
4. <https://forum.mechatronics.by/topic115-pochemu-my-ispolzuem-v-raskhodomerakh-datchiki-kholla-a-ne-gerkony.html>
5. Измерение магнитного поля с использованием датчика Холла / М.Г. Елизарьева, В.Ф. Бадыгов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : сб. мате- А43 риалов IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (10–14 апреля 2023 г., Красноярск): в 3 т. Т. 2.

### References

1. Klimenko, K. A. Comparative analysis of modern current sensors / K. A. Klimenko. Text: immediate // Young scientist. 2011. No. 8 (31). T. 1. P. 66-68. URL: <https://moluch.ru/archive/31/3552/> (date of access: 09/15/2023).
2. Goloshchapov A. Magnetic contactless sensors, reed relays and switches // Electronics NTB scientific and technical journal. Issue No. 9. 2016.
3. <https://formpost.pro/2020/10/22/standex-electronics-reed-sensors-in-comparison-with-d/>
4. <https://forum.mechatronics.by/topic115-pochemu-my-ispolzuem-v-raskhodomerakh-datchiki-kholla-a-ne-gerkony.html>
5. Magnetic field measurement using a Hall sensor / M.G. Elizarijeva, V.F. Badygov // Current problems of aviation and astronautics [Electronic resource]: collection. materials A43 IX Int. scientific-practical conf., dedicated Cosmonautics Day (April 10–14, 2023, Krasnoyarsk): in 3 volumes. T. 2.

© Елизарьева М. Г., Бадыгов В. Ф., 2023

УДК 629.73.08; 629.7.004.67

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА

А. Н. Кормильчик, В. М. Мусонов, В. Ф. Бадьгов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: artem@ro.ru

*Настоящая статья посвящена исследованию авиационного радиовысотомера РВ-5М, определению его эксплуатационно-технических характеристик и погрешностей. Производится анализ работы радиовысотомера, в условиях местности при больших углах крена и тангажа воздушного судна, и представлены пути повышения характеристик РВ.*

*Ключевые слова: авиация, системы посадки, радиовысотомер.*

## INCREASING THE OPERATIONAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE AIRCRAFT RADIO ALTIMETER

A. N. Kormilchik, V. M. Musonov, V. F. Badygov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: artem@ro.ru

*This article is devoted to the study of the RA-5M aviation radio altimeter and determination of its operational error and characteristics. The operation of the radio altimeter is analyzed in terrain conditions at large angles of roll and pitch of the aircraft, and ways to improve RA characteristics are presented.*

*Keywords: aviation, landing systems, radio altimeter.*

**Введение.** Целью данной статьи является определить принцип работы радиовысотомера РВ, его характеристики и рассмотреть возможные пути повышения точности и надёжности данного прибора.

Радиовысотомеры (РВ) малых высот работают по принципу первичной радиолокации и предназначены для измерения текущей истинной высоты полёта  $H$  воздушного судна (ВС) [1].

Принцип построения аппаратуры общий для всех РВ малых высот. В состав РВ входят приемопередатчик и указатель высоты с органами управления РВ. Одинаковы структурные схемы передатчиков и приемников РВ. Аналогична и выдаваемая РВ информация. Основные типовые отличия РВ – это метод обработки преобразованного сигнала. Антенное устройство РВ состоит из идентичных передающей и приемной антенн (плоских типа обратной волны или рупорных). Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) на уровне 3 дБ составляет 60 или 40°, а коэффициент усиления – не менее 8 или 12 соответственно для антенны обратной волны и рупорной антенны. Антенны размещаются на расстоянии не менее 1 м одна за другой на нижней части фюзеляжа ВС [2].

РВ-5М построен на основе узкополосной обработки сигнала и содержит схемы поддержания постоянного значения средней частоты преобразованного сигнала. РВ работает в режиме непрерывного излучения частотно-модулированного (ЧМ) сигнала. Информация о высоте  $H$  полностью пропорциональна сдвигу по времени между ЧМ излучаемым сигналом и отраженного ЧМ сигнала. Частотные РВ требуют применения отдельных передающей и приемной антенн, обладают ограниченной высотой и используются для определения малых высот до 750 м.

Так как антенны РВ закреплены снизу на фюзеляже воздушного судна ВС и имеют с ним одно целое, то при значительных углах (более  $20\pi$ ) крена и тангажа ВС, происходит отклонение луча диаграммы направленности антенны РВ. Следовательно увеличивается погрешность показаний измере-

ния  $H_{PB}$  за счёт влияния наклонной дальности  $h$  (рис. 1). В случаях использования на виражах когда угол крена и тангажа более  $40^\circ$  им пользоваться запрещено.

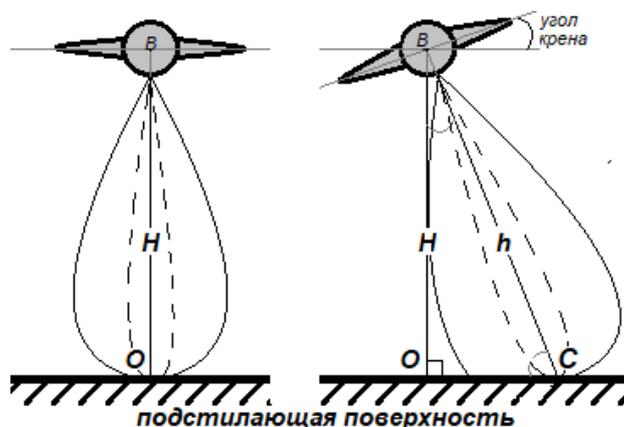


Рис. 1. Изменение наклона ДНА при крене ВС относительно земли.

ДНА передающей антенны имеет ширину около  $40^\circ$ . ДНА можно измерить СВЧ детектором. Зная угол крена и тангажа ВС то истинную высоту можно вычислить по правилам прямоугольного треугольника математическим способом и внести поправку на индикатор высоты (как это применяется на зарубежных ВС). Но на краях ДНА мощность передатчика снижается в 2 раза и РВ тогда теряет параметр высотность (максимальную возможную высоту которую можно измерить), что не позволяет дать точные показания высоты при виражах. Особенно это актуально на вертолётах, которые постоянно передвигаются на небольших высотах в наклонённом состоянии и в военной авиации.

Предложен единственный возможный способ увеличения мощности сигнала и высотности радиовысотомера, это конструктивно установить на стабилизатор антенны, который мог бы всегда отклонять антенну и её ДНА в необходимом направлении на подстилающую поверхность (землю) независимо от наклона ВС в пространстве. Имея такую возможность наклона антенны, можно конструктивно сузить ДНА передающей антенны до  $3-5^\circ$ , что позволит увеличить мощность и чувствительность РВ в 8 и более раз при одной и той-же передаваемой мощности. Следовательно, увеличится и высотность РВ.

Рассмотрены два типа отклонения антенны:

Механический – при котором антенна поворачивается в трёх степенях свободы, в нужную сторону путём зубчатой (червячной) передачи с шаговыми двигателями. Пример запатентованного механического поворотного устройства представлен в докладе Богдановой А.А., Полякова М.В. «устройство управления вектором тяги плазменного двигателя коррекции космического аппарата» [3].

Электромагнитный – при котором происходит отклонение антенны за счёт электромагнитного поля образуемого в трансформаторах механизма отклонения антенны. В таком случае отсутствует трение механических шестерёнок и, следовательно, увеличивается скорость поворота и надёжность относительно механического способа [4].

Данные напряжения об угле отклонения должен формировать разработанный блок стабилизации антенны РВ, эти данные можно брать от гироскопа авиагоризонта, привязав тем самым антенну к авиагоризонту или формировать отдельным внутренним гироскопом (или акселерометрами) данного блока [5].

РВ отвечают за выдачу экипажу и в системы автоматического управления данных о текущей и опасной высотах при посадке ВС.

При заходе ВС на посадку, начиная с высоты примерно 200 м, от РВ поступают сигналы в систему автоматического управления ВС, которые служат для снижения вертикальной скорости до  $0,45$  м/с ( $0,87$  узла) на этапе выравнивания ( $H = 15 \dots 20$  м).

Подведя итог можно сделать вывод, что данное устройство стабилизации антенны несомненно может повысить точность определения высоты, следовательно, и безопасность полёта гражданских ВС при заходе на посадку или полёта вертолёт на малых высотах.

### Библиографические ссылки

1. Авиационная радионавигация: Справочник / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович, Э.А. Лутин, И.Б. Максимов; Под ред. А.А. Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 264 с.
2. Радиовысотомер РВ-5М, Руководство по технической эксплуатации ВР1.001.002 РЭ. 1983 г.
3. Пат. 2684229 Российская федерация, <sup>МПК</sup> В64G 1/00 Поворотное устройство управления вектором тяги двигателя коррекции/ Богданова А.А., Поляков М.В. № 2017143258; заявл. 11.12.2017; опубл. 04.04.2019.
4. Пат. 2564636 Российская федерация, <sup>МПК</sup> H01Q 1/28 Устройство электромагнитного арретирования антенны бортовой радиолокационной станции/ Тенин М.Б., Швачкин А.М., Вик И.П., Ферапонтов В.И., Винокуров С.А. №2014109455/08; заявл. 13.03.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28.
5. Е.Л. Даен, Р.А. Колпаков. Патент №166016 U1. Устройство для определения угла наклона антенны радиолокационной станции/ АО Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники». 15.06.2016 г.

### References

1. Aeronautical radio navigation: Handbook. A.A. Sosnovsky, I.A. Khaimovich, E.A. Lutin, I.B. Maksimov; Ed. A.A. Sosnovsky. Moscow: Transport, 1990. p. 264.
2. Radio altimeter RV-5M, Technical operation Manual ВР1.001.002 RE. 1983.
3. Bogdanova A.A., Polyakov M.V. Povorotnoe ustroystvo upravleniya vektorom tyagi dvigatelya korrektsij [Rotary device for controlling the thrust vector of the correction engine] Patent RF, no. 2684229, 2017.
4. Tenin M.B., Shvachkin A.M., Vik I.P., Ferapontov V.I., Vinokurov S.A. Ustroystvo elektromagnitnogo arretirovaniya anteny bortovoj radiolokacionnoi stancij [Device for electromagnetic locking of onboard radar station antenna]. Patent RF, no. 2564636, 2014
5. E.L. Daen, R.A. Kolpakov. Patent No. 166016 U1. Device for determining the angle of inclination of the radar antenna / JSC Federal Research and Production Center "Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering". 15.06.2016

© Кормильчик А. Н., Мусонов В. М., Бадыгов В. Ф., 2023

УДК629.039.58

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ**

В. В. Максимова, О. Г. Бойко, А. В. Каус, И. М. Муртазин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Nika\_234@mail.ru

*В статье рассмотрена система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий, разрабатываемая для автоматизации системы управления безопасностью полетов в авиакомпании.*

*Ключевые слова: безопасность полетов, автоматизация, прогнозирование.*

## **AUTOMATED FORECASTING SYSTEM AND PREVENTION OF AIRCRAFT ACCIDENTS**

V. V. Maksimova, O. G. Boiko, A. V. Kaus, I. M. Murtazin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Nika\_234@mail.ru

*The article discusses a system for predicting and preventing aviation accidents, developed to automate the aviation safety management system.*

*Keywords: flight safety, automation, forecasting.*

Обеспечение безопасности полетов является одной из важнейших и обязательных задач для любой авиакомпании. Например, в Приложении 19 ИКАО [1], читаем: «Безопасность полетов – это состояние, при котором факторы риска, связанные с авиационной деятельностью, относящейся к эксплуатации воздушных судов или непосредственно обеспечивающей такую эксплуатацию, снижены до приемлемого уровня или удерживаются на нем». Таким образом, одним из главных аспектов управления безопасностью полетов является: выявление фактических и потенциальных угроз безопасности; принятие корректирующих мер, необходимых для уменьшения факторов опасности и риска; обеспечение непрерывного мониторинга и регулярную оценку достигнутого уровня безопасности полетов; создание системы сообщений об опасных факторах и анализ их влияния на безопасность полетов.

В работе рассмотрена автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий (далее – АСППАП) разработанная Группой компаний «Волга-Днепр» [2], задачей данной системы является повышение уровня безопасности полетов в авиапредприятиях путем сбора данных о всех имеющихся и потенциальных опасностях в обеспечении безопасности полетов, их хранение и обработки из различных источников, что в современных реалиях является весьма актуальным. Информация о безопасности полетов для выявления опасных факторов поступает в АСППАП главным образом из различных источников, систем представления данных о безопасности полетов и мероприятий по обеспечению безопасности полетов, к примеру таких как: программы анализа полетных данных, расследования авиационных событий, инспекторские проверки, сообщения по безопасности полетов, дефекты и информация по снятым компонентам. Анализ этой информации, и выработка мер на ее основании, позволяет функционировать системе управления безопасностью полетов.

Целью выполненных исследований является совершенствование процессов управления безопасностью полетов, путем введения системы сбора, хранения и обработки информации из различных источников.

В работе выполнен анализ АСППАП по всем критериям системы управления безопасности полетов (далее – СУБП), которая включает в себя следующие модули:

- Модуль «Система сбора и анализа информации» – основана и реализует в себе систему добровольного, конфиденциального представления данных о происшествиях и опасных факторах.

- Модуль «Показатели безопасности полетов» – позволяет автоматически рассчитывать текущие уровни показателей безопасности полетов и отслеживать их отклонения от заданных уровней, путем совокупности всех имеющихся данных по безопасности полетов в авиапредприятии.

- Модуль «База данных авиационных событий» – аккумулирует в себе и хранит информацию по авиационным событиям, а также осуществляет контроль проведения расследования и выполнения рекомендаций комиссий.

- Модуль «Аудиты/Инспекции» – предназначен для планирования аудитов/инспекций, фиксирования замечаний, загрузки чек-листов и контроля выполнения мероприятий.

- Модуль «Управление рисками» – предназначен для комплексного управления рисками, включая выявление опасных факторов, оценку рисков, разработку и контроль исполнения корректирующих мероприятий.

- Модуль «Анализ техники пилотирования» – предназначен для статистики, вероятности отклонений и отслеживания негативных тенденций в качестве техники пилотирования летным составом путем сбора информации по средствам объективного контроля.

- Модуль «Управление рисками, связанными с утомляемостью» – основан на биоматематической модели утомляемости, которая позволяет прогнозировать уровень бдительности в зависимости от времени суток на основании расчетных значений вложенных в нее функций.

- Модуль «Аэродромы» – предназначен для сбора и хранения информации об опасных факторах и особенностях аэродромов мира.

- Модуль «Документация» – предназначен для структурного хранения документов и ознакомления с ними сотрудников.

- Модуль «Обучение» – главной функцией является планирование обучения, а также создания обучающих курсов и контроль знаний с помощью проверочных вопросов.

- Модуль «Опросы» – подготовка и проведение опросов сотрудников компании, и анализ полученных ответов.

- Модуль «Отчеты» – создание готовых отчетов по различным аспектам деятельности компании и их рассылки по определенным сценариям.

- Модуль «Управление надежностью» – позволяет проводить инженерный анализ надежности систем и компонентов воздушных судов. С помощью данного модуля, возможно, осуществлять анализ по дефектам, по снятым компонентам, задержки рейсов и другим отклонениям в виде таблиц и графиков.

- Модуль «План действий в аварийной обстановке» – предназначен для принятия управленческих решений и их исполнения, для минимизации последствий события, повлиявшего в той или иной степени на безопасность.

В работе отмечено, что разработанные модули, отвечают современным требованиям и включают в себя основные элементы и компоненты СУБП согласно требованиям ИКАО. Для успешного внедрения АСППАП, требуется выполнение следующих действий:

- Приверженность высшего руководства. Система управления безопасностью полетов, как и любая другая управленческая деятельность, требует выделения ресурсов. Говоря другими словами, согласно Doc 9859/ ИКАО Издание 2 [3], читаем: «Нет финансирования – не будет безопасности полетов».

- Непрерывное совершенствование СУБП по ключевым компонентам и элементам, включая определение слабых сторон организации и деятельности авиапредприятия.

- Регулярный анализ парка воздушных судов, его разнотипности (имеет значение для модуля: «Анализ техники пилотирования»), интенсивности полетов в авиапредприятии. Что влечет за собой потребность в выделении дополнительных трудозатрат на этапе внедрения АСППАП и в дальнейшей работе.

- Определение приоритета модулей, чтобы иметь представление какие являются более значимыми для вашего авиапредприятия.

Главное помнить, что СУБП требует постоянного совершенствования. СУБП – это не дело одного дня, это непрерывная деятельность, которая будет успешна только при постоянном совершенствовании.

АСППАП имеет потенциал в авиационной отрасли, поэтому с уверенностью можно отметить такая деятельность «идет в ногу со временем» и отвечает всем законодательным требованиям. Имеет возможность прогнозировать потенциальные угрозы, держать под контролем и выявлять факторы опасности и риски. АСППАП ведет к осуществлению одной из главных целей СУБП в любом авиа-предприятии «предотвращение авиационных событий» и соответственно прогностическую экономию финансовых средств.

Таким образом, совершенствование процессов управления безопасностью полетов, за счет внедрения системы АСППАП позволит не только снизить риски, но и обеспечивать безопасность полетов в сложившихся сложных экономических и политических условиях

### **Библиографические ссылки**

1. Международная организация гражданской авиации. Управление безопасностью полетов: Приложение 19/ ICAO; перевод с английского. Международная организация гражданской авиации, издание второе, 2016.
2. SkySafety. Текст: электронный: [сайт]. URL: <https://skysafety.ru>
3. Международная организация гражданской авиации. Руководство по управлению безопасности полетов: Doc 9859/ ICAO; перевод с английского. Международная организация гражданской авиации, издание второе, 2009.

### **References**

1. International Civil Aviation Organization. Flight safety management: Appendix 19/ICAO; translation from English. International Civil Aviation Organization, second edition, 2016.
2. SkySafety. Text: electronic: [website]. URL: <https://skysafety.ru>
3. International Civil Aviation Organization. Safety Management Manual: Doc 9859/ICAO; translation from English. International Civil Aviation Organization, second edition, 2009.

© Максимова В. В., Бойко О. Г., Каус А. В., Муртазин И. М., 2023

УДК 681.3

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА В IDG С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ LSTM СЛОЯ

А. А. Муминов, Г. А. Муродов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443031, г. Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: amirdzhon.muminov@bk.ru

*В данной статье проведен анализ и прогнозирование температуры масла в интегральном приводе генератора (IDG) самолета A320 с использованием рекуррентной нейронной сети (RNN) с добавлением слоя долгой краткосрочной памяти (LSTM).*

*Ключевые слова: анализ, рекуррентные нейронные сети (RNN), долгая краткосрочная память (LSTM), предварительная обработка данных.*

## PREDICTING OIL TEMPERATURE IN IDG USING A RECURRENT NEURAL NETWORK WITH AN LSTM LAYER

A. A. Muminov, G. A. Murodov

Samara National Research University named after academician S. P. Korolyov  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443031, Russian Federation  
E-mail: amirdzhon.muminov@bk.ru

*This article presents an analysis and forecasting of oil temperature in the Integrated Drive Generator (IDG) of the A320 aircraft using a Recurrent Neural Network (RNN) with the addition of a Long Short-Term Memory (LSTM) layer.*

*Keywords: analysis, recurrent neural networks (RNN), long short-term memory (LSTM), data preprocessing.*

**Введение.** В современной авиационной индустрии сбор и анализ параметрической информации, собранной на борту самолетов, играют ключевую роль в обеспечении безопасности полетов. Однако, на данный момент, эта информация, собранная системами встроенного контроля, просто записывается в черный ящик. Черный ящик никак не анализирует информацию. Его задача сохранить данные. Целью нашего исследования предполагается отправку данных в реальном времени в наземные службы контроля. В этом случае наземная система, имея более высокие вычислительные мощности, способна анализировать информацию и предсказать аварийную ситуацию, которая может произойти с летящим самолетом, отправить экипажу предупреждение для принятия решения.

Для анализа данных от бортовых самописцев мы применили рекуррентные нейронные сети (RNN) с использованием слоя долгой краткосрочной памяти LSTM (Long Short-Term Memory). RNN и LSTM идеально подходят для анализа временных рядов, таких как параметры самолетов. Они позволяют учитывать долгосрочные зависимости в данных.

В модели LSTM каждый временной шаг обрабатывается итеративно, что позволяет предсказывать следующее состояние. Обучение такой сети выполняется с помощью обратного распространения ошибки. Это позволяет эффективно управлять долгосрочными зависимостями в данных.

Однако, основное ограничение RNN заключается в использовании только ранних временных шагов для прогнозирования текущего. Мы внедрили LSTM, чтобы преодолеть это ограничение и эффективно обрабатывать долгосрочные зависимости в данных. LSTM состоит из ячеек памяти, что позволяет сохранять информацию за длительные периоды и обновлять ее, что особенно важно при анализе долгосрочных зависимостей в данных.

**Процесс обучения нашей RNN-LSTM сети.** Процесс обучения нашей рекуррентной нейронной сети (RNN) с использованием слоя долгой краткосрочной памяти (LSTM) для прогнозирования тем-

пературы масла в интегральном приводе генератора (IDG) самолета A320 на основе данных с бортового самописца [1].

Начальным этапом был сбор данных, содержащих информацию о предыдущих состояниях масляной системы IDG и системы охлаждения масла в IDG. Эти данные могли бы быть получены из регистраторов данных полета (FDR). Однако, так как у нас не было доступа к реальным данным FDR, мы создали искусственные данные, используя допустимые значения параметров из различных источников. Эти данные включали предыдущие состояния масляной системы, измеренное давление масла в разные моменты времени при различных условиях и частоту вращения ротора IDG. Собранные данные были предварительно обработаны и подготовлены для обучения RNN, включая нормализацию, разделение на обучающую и тестовую выборки, и обработку выбросов или пропущенных значений.

Для данной задачи выбрана архитектура RNN с использованием слоя LSTM. LSTM подходит для анализа последовательных данных и способен улавливать долгосрочные зависимости [2]. Для оценки ошибки между предсказанными и фактическими значениями температуры масла выбрана подходящая функция потерь, такая как среднеквадратичная ошибка (MSE) или средняя абсолютная ошибка (MAE) [3].

Модель RNN-LSTM обучается путем настройки весов и параметров для минимизации функции потерь и повышения точности прогнозирования. Обучение RNN – это итеративный процесс, требующий настройки гиперпараметров и проверки на тестовых данных. Важно отметить, что обучение RNN требует большого объема данных и тщательной предварительной обработки для достижения высокой точности прогнозирования. Также рекомендуется проверять модель с новыми данными для проверки ее универсальности.

Для создания и обучения нашей RNN с LSTM-слоем мы выбрали Python [4], популярный язык в машинном обучении. Мы собрали данные о температуре масла в IDG самолета

A320, получив 10 000 измерений из технической документации. Данные включали температуры масла на входе и выходе из IDG, давление масла, частоту вращения ротора и температуру охлаждающей жидкости.

Предварительная обработка включала масштабирование и нормализацию данных для лучшей производительности модели. Мы создали матрицу состояний, чтобы связать параметры во времени и учесть их влияние на температуру масла.

Для обучения использовали функции активации tanh и sigmoid. Процесс обучения включал сбор данных, предварительную обработку, создание матрицы состояний и обучение сети. Было разработано модель для прогнозирования изменений температуры масла в IDG на основе входных данных. Для нашей задачи создана и обучена рекуррентная нейронная сеть с LSTM-слоем.

Архитектура сети включает в себя входной слой LSTM для последовательных данных, пять скрытых слоев LSTM для обработки долгосрочных зависимостей и выходной слой Dense, предсказывающий температуру масла в IDG самолета A320 [5].

Между LSTM-слоями используются слои нейронов с функцией активации ReLU для обработки нелинейных данных. Обучение сети проходило в течение 100 эпох, корректируя веса на основе ошибки между прогнозами и реальными значениями.

Метод обучения с учителем использовался с метками для каждого входного значения. После обучения мы проверили производительность на новых данных, видя близкие к реальным прогнозы (рис. 1).

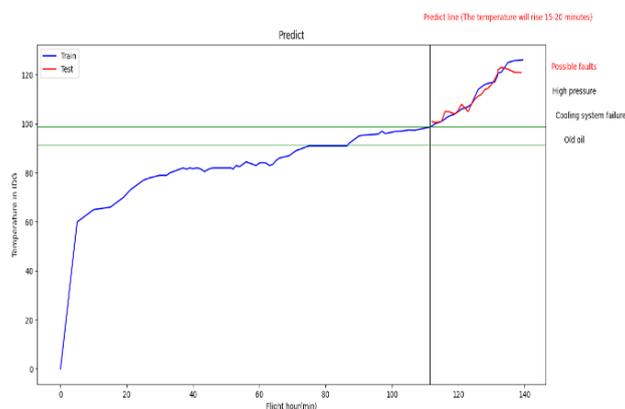


Рис. 1. График прогноза выходной температуры IDG

Среднеквадратическая ошибка между реальными и прогнозируемыми значениями минимальна (рис. 2), подтверждая высокую точность модели.

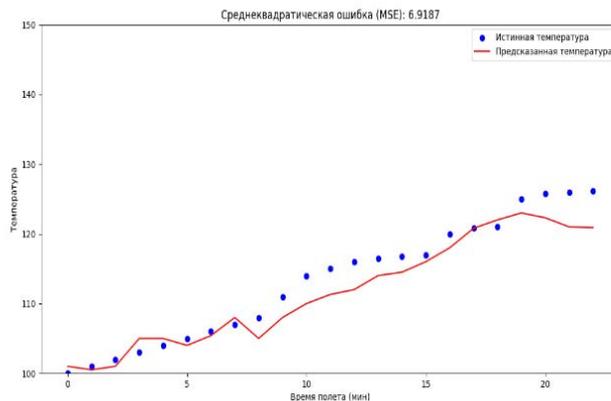


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка нашей сети

Таким образом, наша RNN-LSTM модель успешно обучена и способна прогнозировать изменения температуры масла в IDG самолета A-320 на основе данных.

### Библиографические ссылки

1. Учебное пособие для семейства A320 по планеру и силовой установке / электронике / авионике 3-го уровня Техническая подготовка, выпуск 2 .2004. 3700 с
2. Инструменты искусственного интеллекта для систем поддержки принятия решений при мониторинге состояния и диагностике Диего Галар Паскуаль.2015-528с.
3. Электрические и электронные системы самолетов, второе издание Дэвид Уайатт, Майк Тули, 2018. 439 с.
4. Искусственный интеллект с помощью Python- Teik Toe Teoh, Чжэнронг, 2022. 334с.
5. Инструменты искусственного интеллекта для систем поддержки принятия решений при мониторинге состояния и диагностике Диего Галар Паскуаль. 2015. 528с.

### References

1. A320 Family Training Manual Airframe & Powerplant / Electro / Avionics Level 3- Technical Training THTA Issue 2 .2004. 3700с
2. Artificial Intelligence Tools Decision support systems in condition monitoring and diagnosis Diego Galar Pascual. 2015. 528с.
3. Aircraft Electrical and Electronic Systems Second Edition- David Wyatt, Mike Tooley, 2018. 439 с.
4. Artificial Intelligence with Python- Teik Toe Teoh, Zheng Rong, 2022. 334 с.
5. Artificial Intelligence Tools Decision support systems in condition monitoring and diagnosis Diego Galar Pascual. 2015. 528 с.

© Муминов А. А., Муродов Г. А., 2023

УДК629.039.58

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ АВИАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАРУБЕЖНОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

И. М. Муртазин, А. В. Каус, В. В. Максимова, О. Г. Бойко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Nika\_234@mail.ru

*В статье рассмотрены проблемы современного состояния авиатранспортной логистики Российской Федерации, возникшие в последние два года и предложены пути их немедленного решения*

*Ключевые слова: авиационная техника, обеспечение комплектующими, логистические цепочки.*

## STUDY OF PROBLEMS OF AVIATION TECHNICAL SUPPORT OF FOREIGN AVIATION EQUIPMENT AND WAYS OF THEIR SOLUTION

I. M. Murtazin, A. V. Kaus, V. V. Maksimova, O. G. Boyko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Nika\_234@mail.ru

*In the article the problems of a modern state of air transport logistics of the Russian Federation, which have arisen in the last two years, are considered and the ways of their immediate solution are offered.*

*Key words: aviation equipment, supply of components, logistics chains.*

Проблемы авиационно-технического обеспечения авиационной техники иностранного производства были в нашей стране во все года. С приходом нового типа воздушного судна известного мирового производителя дальнемагистральных воздушных судов, либо же бизнес джетов или даже воздушных судов местного значения, всегда приходится корректировать или налаживать с нуля цепочку поставок ранее неиспользуемых компонентов авиационной техники, а так же организацию их ремонта. Проходит длительный период времени до момента открытия на территории РФ, одобренного производителем, сервисного центра по обслуживанию и/или ремонту компонентов нового типа воздушного судна, допущенного к эксплуатации в РФ.

Кроме того, для положительного заключения аудита производителя на получение сертификата сервисного центра, необходимо создать неснижаемый запас оригинальных расходных материалов и масел, а так же обеспечить производственные цеха оборудованием одобренным конкретно для этого типа ВС, что влечёт за собой большие финансовые вложения и как следствие длительный анализ рентабельности проектов коммерческими компаниями.

Многие производители не допускают российские компании к выполнению больших, «глубоких» форм периодического технического обслуживания воздушных судов собственного производства и тогда, для поддержания лётной годности своего парка ВС, российский эксплуатант вынужден выполнять международные перелёты, в одобренные производителем, сервисные центры за рубежом. Кроме того, ни одно российское предприятие не имеет допуска на выполнение капитального ремонта авиационных двигателей и вспомогательных силовых установок, эксплуатируемых на воздушных судах гражданской авиации, что приводит к необходимости поиска одобренных производителем исполнителей на территории иностранных государств.

Введённые против РФ санкции усложнили не только материально-техническое обеспечение воздушных судов иностранного производства, но и их эксплуатацию. В техническом обслуживании появляется всё больше пробелов, относящихся как к дефициту запасных частей, так и к выполнению актуальных бюллетеней, выпускаемых производителем. Все иностранные компании прекратили офи-

циальную техническую поддержку российских эксплуатантов. (Постановление здесь №353 [1]) Кроме того, инженерный состав не имеет возможности оперативного решения при возникновении непопторяющегося отказа техники. Представители иностранных компаний отказывают специалистам в информации по устранению дефекта.

Все ранее наработанные цепочки поставок авиационно-технического имущества разорваны. Заводы изготовители остановили отгрузки эксплуатантам из РФ. Всемирные транспортные компании больше не обслуживают территорию нашего государства. Сроки доставки материалов увеличились кратно. Санкционное давление западных стран увеличивается ежемесячно, что зачастую прерывает новые, с трудом наработанные схемы поставок. Многие из коммерческих компаний-поставщиков отказываются от сотрудничества, так как в тех же Соединённых Штатах Америки началось уголовное преследование физических лиц, участвовавших в обходе санкций.

Конечно, Правительство РФ стремится сохранить парк иностранной техники, но на примере Постановления Правительства РФ от 09.03.2022г. №311 «О мерах по реализации Указа Президента Российской Федерации от 8 марта 2022г. №100» (о применении в целях обеспечения безопасности РФ специальных экономических мер в сфере ВЭД) [2] и Постановление Правительства РФ от 09.03.2022г. №312 «О введении на временной основе разрешительного порядка вывоза отдельных видов товаров за пределы территории Российской Федерации» [3], эксплуатантам ВС они не помогают, а наоборот, мешают. Данные постановления запрещают вывоз порядка 80% комплектующих изделий за границу, в том числе для капитального ремонта. Вышеуказанные Постановления подразумевают выдачу разрешительных документов на вывоз, но на практике таких разрешений единицы, если они вообще выдавались.

Из-за отсутствия юридической защищённости, при организации капитального ремонта комплектующих за рубежом, эксплуатант рискует не получить их обратно, так как многие исполнители просто конфискуют изделия, если в их истории читается Российский эксплуатант.

На фоне таких сложностей, всё больше эксплуатантов прибегают к решению проблемы комплектации путём приобретения изделий. Но антироссийские санкции постоянно ужесточают, в связи с чем, некоторые компоненты (особенно двойного назначения) становится покупать все сложнее. Дополнительно увеличиваются количество наименований на складском хранении (неликвидов) и происходит опустошение рынка, за счёт невозможности ремонта изделий.

Отключение работающих на территории РФ коммерческих банков от международной системы SWIFT, так же добавляет трудностей для своевременного снабжения воздушных судов. Расчёты в долларах США или Евро на сегодняшний день не доступны. Авиакомпании вынуждены платить в рублях РФ в банки дружественных стран и лишь затем, после конвертации в национальную валюту, приобретаются доллары США или Евро, для оплаты необходимого имущества. Маршрут движения денежных средств стал дольше, стоимость изделий увеличивается до 25% только из-за конвертации валют и дополнительных сборов сторонних банков.

Все вышесказанные проблемы требуют оперативного решения. Необходимо как можно быстрее осваивать капитальный ремонт комплектующих изделий иностранной техники и выпуск альтернативных расходных материалов для выполнения технического обслуживания ВС. Правительство наделило полномочиями «разработчика иностранных двигателей и комплектующих» ряд российских предприятий, что позволило выпускать решения на продление межремонтного ресурса и ресурса до первого капитального ремонта ряду двигателей и ВСУ, но ведь эта мера временная. Для освоения капитального ремонта даже самого простого ВСУ типа Safir 5K/G MI, кстати установленного на Росийском вертолёте Ми-8МТВ-1, предприятие АО «УЗГА» озвучило потребность в финансировании в размере 3500 миллионов рублей и срок на освоение 3 года. Источника финансирования пока не нашлось.

Кроме того, необходимо проанализировать возможность отмены действующих Постановлений Правительства, ограничивающих вывоз комплектующих из РФ. Это бы сильно облегчило ремонт компонентов за рубежом.

В заключение следует отметить, что если санкции не ослабнут, парк ВС иностранного производства сильно сократится. Надеяться на освоение капитального ремонта и импортозамещение можно, но при лучшем исходе через 3-5 лет. Ввиду отсутствия достаточного количества ВС собственного производства, особенно с возможностью сесть на грунтовое покрытие, авиацию нашей страны ждёт совсем не светлое будущее.

### Библиографические ссылки

1. Постановление Правительства РФ от 12 марта 2022 г. № 353 «Об особенностях разрешительной деятельности в Российской Федерации в 2022 году» М:- 2022, 60 с/
2. Постановление Правительства РФ от 09.03.2022 № 311 "О мерах по реализации Указа Президента Российской Федерации от 8 марта 2022 г. N 100". М:- 2022, 27 с.
3. Постановление Правительства РФ от 09.03.2022г. №312 «О введении на временной основе разрешительного порядка вывоза отдельных видов товаров за пределы территории Российской Федерации». М:- 2022, 39 с.

### References

1. Decree of the Economy of the Russian Federation of March 12, 2022 No. 353 “On the features of licensing activities in the Russian Federation in 2022” M: 2022, 60 pages/
2. Development Decree of the Russian Federation dated March 9, 2022 No. 311 “On measures to implement Decree of the President of the Russian Federation dated March 8, 2022 N 100.” M:- 2022, 27 p.
3. Decree of the Government of the Russian Federation of 03/09/2022. No. 312 “On the introduction on a temporary basis of a permitting procedure for the export of certain types of goods on the territory of the Russian Federation.” M:- 2022, 39 p.

© Муртазин И. М., Каус А. В., Максимова В. В., Бойко О. Г., 2023

УДК 629.7

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
СТУДЕНТОВ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ВОЗДУШНЫХ  
СУДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Е. А. Нартов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: evgeniy\_n@sibsau.ru

*В работе рассмотрена проблема наработки физических навыков студента для специальностей Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей и Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов и применения виртуальных лабораторных комплексов.*

*Ключевые слова: виртуальные лабораторные комплексы, практика, навыки, техническая эксплуатация.*

**MODERN PROBLEMS OF PRACTICAL TRAINING  
AIRCRAFT MAINTENANCE STUDENTS VESSELS USING VIRTUAL  
LABORATORY COMPLEXES**

E. A. Nartov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: evgeniy\_n@sibsau.ru

*The work examines the problem of developing student physical skills for the specialties Technical Operation of Aircraft and Engines and Technical Operation of Aviation Electrical Systems and Flight Navigation Systems and the use of virtual laboratory complexes.*

*Keywords: virtual laboratory complexes, practice, skills, technical operation.*

Практическая подготовка студентов технической эксплуатации воздушных судов разделяется на следующие составляющие:

- теоретическая (теоретические знания конкретного воздушного судна, его функциональных систем – работа и конструкция, сопроводительной эксплуатационно-технической документации);
- практическая (умение пользоваться эксплуатационно-технической документацией, умение находить и устранять типичные неисправности и дефекты, умение пользоваться инструментом и приспособлениями при проведении работ по техническому обслуживанию).

В последнее время некоторые ВУЗы стали использовать виртуальные лабораторные курсы, вместо реальных практических работ, в том числе и при подготовке по выше упомянутой специальности. Оправдано оно или нет, как повлияет виртуальная практика на результаты подготовки студентов? Разберем кратко эти вопросы.

Человек обладает следующим набором памяти: зрительная, слуховая, двигательная, эмоциональная, смешанная [2 – 4]. Теоретические занятия включают в работу зрительную, эмоциональную память, двигательная задействована только в процессе составления конспекта. Практические занятия призваны соединить воедино теоретические знания о конкретном типе воздушного судна с физическими навыками его технического обслуживания.

По результатам исследований психологов [4], процесс запоминания включенного в какую-либо практическую деятельность, оказывается наиболее эффективным, так как зависит от деятельности, в

ходе которой он совершается. В процессе обучения с использованием виртуальных лабораторных комплексов изъята процедура физического воздействия на объект. Непосредственно в технической эксплуатации воздушного судна присутствует целый комплекс физических действий, который в теории освоить невозможно, а именно: процесс контровки соединений, доступа к агрегату воздушного судна, расположенного в труднодоступном месте, правильная установка агрегата по углу и/или расстоянию, выставление зазоров между стяжными хомутами, правилами и моментами затяжки гаек фланцевых соединений, использование специальных приспособлений, процесс демонтажа агрегата крепежные соединения которого прикипели или покрылись коррозией и многое другое. При виртуальном обучении можно освоить только алгоритм действий и увидеть к какой точке летательного аппарата нужно подойти (в комплексах с полноценной графической реализацией). Во время практики студенты также оценивают свои физические возможности для проведения той или иной операции технического обслуживания, что в виртуальной среде оценить невозможно.

Виртуальные лабораторные комплексы хороши тем, что удешевляют процесс обучения [1, 5], но не делают его полноценным. Так, где же следует применять их? Если говорить о технической эксплуатации летательных аппаратов, двигателей и электросистем, то они очень хорошо подойдут для специалистов АиРЭО в работах связанных с проверкой электросистем в кабине экипажа (причем, можно смоделировать любое воздушное судно). Для студентов направления ТЭЛАД можно виртуализировать процесс запуска двигателя и гонки его после проведения технического обслуживания с моделированием отказов и неисправностей, также можно включить работы, которые для студентов в процессе обучения производить опасно и дорого, к таким работам можно отнести вывеску воздушного судна для проверки работоспособности системы уборки-выпуска шасси при проверке на земле.

Для тех студентов которым трудно оперировать визуальными образами и представлять работу узла или агрегата (примером может служить работа комбинированного гидравлического агрегата вертолета Ми-8 КАУ-30Б или рулевого привода РП-55(56, 57) самолета Ту-154, процессы проходящие в насосе-регуляторе управления двигателями и в самом газотурбинном двигателе) необходима 3D-анимация работы такого рода агрегатов.

И так, подытожим. Без практики студент не сможет оценить свои физические возможности и приобрести мышечную память при проведении технического обслуживания воздушного судна (чего чаще всего в первую очередь хотят получить авиакомпании от выпускника), причем, авиакомпании, как показывает опыт, не готовы брать большое количество студентов на распределенную практику на средних и старших курсах обучения (максимум 3 – 4 человека и не все авиакомпании). Любой новый физический навык нарабатывается в течении 1,5 месяцев, при условии его повторения каждый день [2 – 4].

Таким образом, как бы не были привлекательны виртуальные лабораторные комплексы своей дешевизной в долговременной перспективе, без практики выпускник является неполноценным специалистом, который может и физически не выдержать работу в авиакомпании.

В условиях 4-х годичного обучения виртуальные лабораторные комплексы помогут быстрее усвоить теоретический материал (как было отмечено выше) и ознакомиться с работами которые являются смежными для специализации и о которых должно быть представление у выпускника.

### Библиографические ссылки

1. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза/ Б. М. Саданова, А. В. Олейникова, И. В. Альберти [и др.]. Текст : непосредственный Молодой ученый. 2016. № 4 (108). с. 71-74. URL: <https://moluch.ru/archive/108/25945/> (дата обращения: 13.09.2023).
2. Берн Э. Введение в психиатрию и психоанализ для непосвященных: Пер. с англ. А.И. Федорова. С.-Петербург:МФИН, 1992. 448 с.
3. Аткинсон Р. Человеческая память и процесс обучения: пер. с англ. Под общей ред. док. псих. наук Ю. М. Забродина. Москва: «ПРОГРЕСС», 1980. 528с.
4. Маклаков А. Г. Общая психология. СПб.: Питер, 2001. 592 с.
5. Машиньян А. А., Кочергина Н. В., Бирюкова О. В., Бабаев Д. Д. Виртуальные лабораторные работы по физике в техническом вузе Перспективы науки и образования. 2022. № 4 (58). с. 209-224. doi: 10.32744/pse.2022.4.13

### References

1. Primeneniye vozmozhnostey virtual'nykh laboratoriy v uchebnom protsesse tekhnicheskogo vuza [Application of the capabilities of virtual laboratories in the educational process of a technical university] B. M. Sadanova, A. V. Oleynikova, I. V. Alberti [etc.]. Text: immediate // Young scientist. 2016. No. 4 (108). pp. 71-74. URL: <https://moluch.ru/archive/108/25945/> (date of access: 09.13.2023).
2. Bern E. Vvedeniye v psikiatriyu i psikhoanaliz dlya neposvyashchennykh [Introduction to psychiatry and psychoanalysis for the uninitiated]: Trans. from English A.I. Fedorov. St. Petersburg: MFIN, 1992. 448 p.
3. Atkinson R. Chelovecheskaya pamyat' i protsess obucheniya [Human memory and the learning process]: trans. from English Under the general editorship. doc. psycho. Sciences Yu. M. Zabrodina. Moscow: "PROGRESS", 1980. 528 p.
4. Maklakov A. G. Obshchaya psikhologiya [General psychology]. St. Petersburg: Peter, 2001. 592 p.
5. Mashinyan, A. A., Kochergina, N. V., Babaev, D. D., & Biriukova, O. V. (2022). Virtual laboratory work in physics at a technical university. *Perspektivy nauki i obrazovaniya Perspectives of Science and Education*, 58 (4), 209-224. doi: 10.32744/pse.2022.4.13

© Нартов Е. А., 2023

УДК 629.73

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА ТУ-214

Е. Е. Сяков, В. Е. Сяков, Е. А. Ачкасова, О. Г. Бойко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: tupolev5k@gmail.com

*В статье представлена аргументация выбора российского представителя в качестве замены самолетов зарубежного производства.*

*Ключевые слова: перспективы использования, метод экспертных оценок, стоимость летного часа, конкурентоспособность, импортозамещение*

## ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF USING THE TU-214 AIRCRAFT

E. E. Siakov, V. E. Siakov, E. A. Achkasova, O. G. Boyko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tupolev5k@gmail.com

*The article presents the rationale for choosing a Russian representative as a replacement for foreign-made aircraft.*

*Keywords: prospects of use, method of expert assessments, cost of flight hours, competitiveness, import substitution*

За минувшее время авиаотрасль частично адаптировалась к новой реальности, парк зарубежных воздушных судов продолжает эксплуатироваться, найдены возможности для выполнения технического обслуживания и покупки запасных частей. В перспективе российская авиация будет эксплуатировать иностранный флот, который имеет на сегодняшний день. Правительство дало возможность авиакомпаниям снимать запчасти с одних самолетов и устанавливать на другие. Но уже сегодня остро стоит вопрос о возобновлении отечественного производства.

Рассмотрим самолеты, эксплуатируемые в России:

– Boeing, занимает лидирующие позиции в мире по доле в грузовые авиаперевозки, а также в среднемагистральном и дальнемагистральном пассажирском сегменте. Преимущественно в России используются такие типы как: B737, B747, B777, B757, B767.

– Airbus, уступает предшествующему лишь в грузовом сегменте. Широкое распространение имеют типы: A-320F, A-330, A-350.

– Embraer. Всего два типа: E170, E190.

Ведущие авиакомпании России «Аэрофлот» (входящими в нее дочерние компании), «S7 Airlines», «Уральские Авиалинии», «Nordwind» и другие, эксплуатируют вышеперечисленные типы авиационной техники [1].

На данный момент единственным вариантом является Ту-214. Самолет имеет абсолютно российское производство и имеет достаточно современные технологии. Самолет оснащен бортовой электроникой, которая может обеспечивать заданные характеристики устойчивости и управляемости, выполнять автоматическую балансировку самолёта стабилизатором в продольном канале, защищать от выхода за эксплуатационные ограничения, ограничивать отклонения руля высоты и руля направления по режимам, а также осуществлять автоматическое управление по сигналам вычислительной системы управления полётом.

Российский самолет имеет преимущество во взлетной массе (см. таблицу 1), благодаря чему может принять на борт больше полезной нагрузки.

Главным недостатком является топливная экономичность. Эксплуатируемые двигатели на Ту-214 потребляют на один час лета больше одной тонны керосина.

К примеру, тонна керосина марки ТС1 имеет стоимость 52 781 рубль (средняя стоимость). Продолжительность рейса Москва-Красноярск составляет 4 часа 45 минут, округлим до 5 часов. Среднее значение стоимости топлива будет составлять 263 905 рублей.

Таблица 1

Сравнительная таблица рассматриваемых самолетов

Характеристика	A320 neo	B737-800 NG	Tu-214
Масса пустого ВС, кг	~42 100	41 413	59 000
Макс. взлетная масса, кг	78 000	79 010	110 750
Макс. коммерческий вес, кг	16 600	20 540	25 200
Дальность при макс. комм. загрузке, км	6 850	5 400	4 340
Макс. скорость, км/ч	890	876	850
Двигатели	PW1100G-JM	CFM 56-7B27	ПС-90А
Расход топлива при максимальной крейсерской загрузке, кг/ч	2 100	2 526	3 200
Требуемая длина ВПП, м	2 090	2 400	2 500
Цена нового ВС, млн. \$	129,5	106,1	30

Исходя из таблицы Ту-214 выгоден в стоимости. Максимальная дальность полета Ту-214 составляет 6 670 км, что реализуемо для масштабов страны [3].

Ту-214 имеет все перспективы массового использования в авиакомпаниях России при комплексной проработке следующих пунктов: целевое финансирование на развитие КБ, аэропортов и организаций по техническому обслуживанию и ремонту, наращивание мощностей авиазаводов по выпуску единиц ВС в год, создание новых испытательных лабораторий с современным оборудованием, подготовка специалистов авиационной отрасли на всех уровнях образования, целевая разработка автоматизированных систем для управления процессами технического обслуживания, создание современной системы технического обслуживания и ремонта для ВС Ту-214, облегчение конструкции самолета и установка экологически выгодных авиадвигателей.

#### Библиографические ссылки

1. Airlines Inform. 30 крупнейших авиакомпаний России 2020 [Электронный ресурс] URL: [https://www.airlines-inform.ru/rankings/russian\\_2019.html](https://www.airlines-inform.ru/rankings/russian_2019.html) (дата обращения 09.04.2022).
2. Объединенная авиастроительная корпорация [Электронный ресурс] URL: <https://www.uacrussia.ru/ru/aircraft/lineup/civil/superjet-100> (дата обращения 09.04.2022).
3. Airlines Inform. Tupolev Tu-214 [Электронный ресурс] URL: <https://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/tu-214.html> (дата обращения 09.04.2022).

#### References

1. Airlines Inform. [30 largest airlines in Russia 2020]. Available at: [https://www.airlines-inform.ru/rankings/russian\\_2019.html](https://www.airlines-inform.ru/rankings/russian_2019.html) (accessed 09.04.2022).
2. Ob"edinennaya aviastroitel'naya korporaciya. [United Aircraft Corporation] Available at: <https://www.uacrussia.ru/ru/aircraft/lineup/civil/superjet-100> (accessed 09.04.2022).
3. Airlines Inform. Tupolev Tu-214 Available at: <https://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/tu-214.html> (accessed 09.04.2022).



**Секция**

**«ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА  
В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

УДК 62-713.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО АНТИФРИЗА

Н. А. Абрамов, И. Р. Михайлов, С. Н. Долматов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nikitabrams@mail.ru

*В работе определялась температура кипения нескольких марок автомобильных антифризов, имеющих широкое распространение и реализуемых в торговых сетях г. Красноярск. Опыт проводился в лаборатории Установлено, что антифриз с торговой маркой 365 дней имеет температуру кипения 99,4 °С и не может быть рекомендован к применению. Антифризы с торговыми марками Sintek, Felix, Лента соответствуют требованиям и могут рекомендоваться к применению.*

*Ключевые слова: антифриз, жидкость, охлаждение, температура, опыт, кипения.*

## DETERMINATION OF BOILING TEMPERATURE OF AUTOMOBILE ANTIFREEZE

N. A. Abramov, I. R. Mikhailov, S. N. Dolmatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nikitabrams@mail.ru

*The work determined the boiling point of several brands of automotive antifreeze, which are widely used and sold in retail chains in Krasnoyarsk. It has been established that antifreeze with the 365 days trademark has a boiling point of 99.4 °C and cannot be recommended for use. Antifreezes with the trademarks Sintek, Felix, Lenta meet the requirements and can be recommended for use.*

*Keywords: antifreeze, liquid, cooling, temperature, experience, boiling.*

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля является сложным агрегатом, преобразующим энергию, получаемую при горении жидких или газообразных углеводородов, в механическую энергию. Обязательным условием повышения КПД теплового двигателя является полное использование тепловой энергии при превращении ее в механическую. ДВС, имеют принципиальную и отличительную черту, позволяющую классифицировать такие двигатели, как имеющие именно «внутреннее» сгорание топлива. Т. е. сама область горения углеводородов находится внутри двигателя и представляет собой камеру сгорания. При горении бензина или дизельного топлива температура в камере сгорания достигает 2000 °С. Тогда как основные материалы, воспринимающие давление расширения горючих газов (днище поршня, клапана и их седла) имеют температуру плавления от 700 °С (алюминиевые сплавы) до 1500 °С (сталь). Камера сгорания, как и детали цилиндра-поршневой группы испытывают высокие термические и механические нагрузки и изготавливаются из термостойких материалов. Но это не дает гарантии от перегрева и возможного заклинивания подвижных частей двигателя. Для обеспечения стабильного терморегулирования ДВС обязательно имеет систему охлаждения, которая может быть воздушной или жидкостной. Согласно [1] система охлаждения двигателя – это одна из основных и ключевых систем автомобиля без которой эксплуатация транспортного средства невозможна или весьма затруднительна.

Система охлаждения включает в себя комплекс механизмов обеспечивающих поддержание рабочей температуры ДВС. В период эксплуатации ДВС при неисправной системе охлаждения возможен перегрев агрегата и дальнейший выход из строя узлов и механизмов. ДВС с жидкостным охлаждением эксплуатируется, как правило, при определенной нормативной температуре, обусловленной как самой конструкцией, так и условиями эксплуатации. Современные, весьма теплонагруженные ДВС,

имеют рабочую температуру до 105 °С. Двигатели устаревшей конструкции работают при меньших рабочих температурах – до 85 °С. Основной функцией системы охлаждения согласно [2] является поддержание рабочей температуры ДВС в независимости от природных климатических факторов. На заре своего развития ДВС с жидкостным охлаждением в качестве охлаждающего агента использовали воду. Это сопровождалось целым рядом неудобств, таких как высокая коррозионная активность воды, риск замерзания и разрушения ДВС. Поэтому на современном этапе развития, обязательным условием долгой и безаварийной работы ДВС является применение в качестве охлаждающей жидкости антифриза.

Согласно литературным данным [3] основным компонентом охлаждающей жидкости является дистиллированная вода в смеси с одно и многогранным спиртом в различных пропорциях, а также содержатся ингибиторы коррозии и флуоресцентные добавки (красители). Этиленгликоль используется в качестве спиртовой основы (до 25%), для морозоустойчивости в суровых климатических условиях.

Широкое распространение получили охлаждающие жидкости на основе раствора этиленгликоля. Процентное соотношение этиленгликоля в антифризе чаще всего составляет 50–60%. При таких соотношениях обеспечивается рабочий диапазон применения от – 30°С до – 65°С. Помимо требования низкой температуры кристаллизации очень важно достигнуть высокой температуры кипения.

**Цель исследования:** провести экспериментальное исследование по определению температуры кипения антифризов, имеющих широкое распространение на рынке эксплуатационных жидкостей г. Красноярск.

**Задачи:**

1) Сформулировать основные требования, которым должен соответствовать автомобильный антифриз.

2) Подготовиться к эксперименту (необходимое оборудование и материалы).

3) Определить момент закипания исследуемой охлаждающей жидкости.

Для уверенной работы ДВС в условиях положительных температур требуется достаточно высокая температура кипения; для работы в зимнее время требуется низкая температура кристаллизации; неагрессивность к уплотнениям, трубкам и шлангам из латуни, резины, пластика; высокая текучесть для обеспечения уверенной циркуляции; исключение коррозии деталей ДВС; доступность и простота производства, хранения, неадовитость.

Такой широкий перечень требований, часто взаимоисключающий, заставляет разработчиков и производителей постоянно совершенствовать рецептуры антифризов.

В настоящее время охлаждающую жидкость для двигателей внутреннего сгорания можно встретить не только в специализированных автомагазинах, но и в других современных гипермаркетах. Так, например, для города Красноярск широкий ассортимент охлаждающей жидкости представлен на полках гипермаркета «Лента», таких производителей как: «Felix», «Sintec», «Rolf», «365 дней», «Лента», данные марки пользуются устойчивым спросом на рынке.

Согласно литературным данным [4] температура кипения антифриза при нормальном атмосферном давлении должна составлять 110-120°С. В соответствии с задачами исследования, был проведен эксперимент по определению температуры кипения 4-х марок антифризов. Для проведения эксперимента необходимы: мерный сосуд, антифриз различных марок, термометр с термопарой, нагревательный элемент (газовая горелка). Температура фиксировалась при помощи термопары и прибора контроля. Показатели барометра в лаборатории составляли 760 мм.рт.ст.

Был проведен эксперимент, в процессе которого в мерный сосуд помещалась проба антифриза и посредством газовой горелки доводилась до кипения. При этом в сосуд помещалась термопара и фиксировалась температура начала кипения. На таблице 3 представлены полученные результаты.

Таблица 1

Показателей температуры кипение антифриза

Образцы	Температура кипения ( t °С)	Рейтинг
Sintec	104	1
Лента	100,4	3
365 дней	99,4	4
Felix	102,4	2

В результате исследования можно сделать вывод, что по показателю «температура кипения» антифриз марки «365 Дней» показал низкие результаты, так как кипение начиналось уже при температуре 99,4 °С. Такая низкая температура кипения делает невозможным эксплуатацию этого антифриза в системах охлаждения современных высоконагруженных ДВС. Также установлен лидер по качеству среди исследованных образцов – это антифриз марки «Sintec», который закипает при температуре 104°С. Исследования проводились в технической лаборатории техникума с соблюдением всех норм и правил безопасности.

### Библиографический ссылки

1. Чурсин, С. С. Что лучше Антифриз или Тосол / С. С. Чурсин, А. Ю. Клоков, Е. С. Журавлева // Вопросы развития технических систем, машин и механизмов : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Оренбург, 08 июля 2019 года. Оренбург: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2019. С. 43-45. EDN KIJHU.
2. Шаяхкамова, А. Б. Обоснование параметров строительного материала на основе использования низкокачественной древесины / А. Б. Шаяхкамова // Инженерные кадры будущее инновационной экономики России : Материалы Всероссийской студенческой конференции: в 8 частях, Йошкар-Ола, 23–28 ноября 2015 года. Том Часть 2. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. С. 171-172.
3. Технологии переработки древесных отходов // Комплексное устойчивое управление отходами. Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность: учебное пособие. Москва : Издательский дом Академии Естествознания, 2016. С. 162-218.
4. Курень Сергей Григорьевич, Дьяченко Анатолий Дмитриевич, Сокол Николай Александрович, Клецкий Михаил Ефимович, Цупак Евгений Борисович, Вассель Сергей Сергеевич Квантовохимическое исследование компонентов автомобильного антифриза // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2009.
5. Электронный источник <https://www.drive2.ru/b/470816652523471193/>

### References

1. Chursin, S. S. Chto luchshe Antifriz ili Tosol / S. S. Chursin, A. Yu. Klokov, E. S. Zhuravleva // Voprosy razvitiya tekhnicheskikh sistem, mashin i mekhanizmov : sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Orenburg, 08 iyulya 2019 goda. Orenburg: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy", 2019. S. 43-45. EDN KIJHU.
2. Shayakhkhamova, A. B. Obosnovanie parametrov stroitel'nogo materiala na osnove ispol'zovaniya nizkokachestvennoi drevesiny / A. B. Shayakhkhamova // Inzhenernye kadry budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii : Materialy Vserossiiskoi studencheskoi konferentsii: v 8 chastyakh, Ioshkar-Ola, 23–28 noyabrya 2015 goda. Tom Chast' 2. Ioshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2015. S. 171-172.
3. Tekhnologii pererabotki drevesnykh otkhodov // Kompleksnoe ustoichivoe upravlenie otkhodami. Derivoobrabatyvayushchaya i tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost': uchebnoe posobie. Moskva : Izdatel'skii dom Akademii Estestvoznaniya, 2016. S. 162-218.
4. Kuren' Sergei Grigor'evich, D'yachenko Anatolii Dmitrievich, Sokol Nikolai Aleksandrovich, Kletskii Mikhail Efimovich, Tsupak Evgenii Borisovich, Vassel' Sergei Sergeevich Kvantovokhimicheskoe issledovanie komponentov avtomobil'nogo antifriza // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki. 2009.
5. Elektronnyi istochnik <https://www.drive2.ru/b/470816652523471193/>

© Абрамов Н. А., Михайлов И. Р., Долматов С. Н., 2023

УДК 66.965

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНОЙ ТКАНИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М. А. Агафонов\*, И. С. Кондаков, А. А. Пельмская, Л. В. Ручкин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: mihail.agafonov.01@mail.ru

*Проведён анализ способов производства композитной ткани автоматизированными и полуавтоматизированными станками.*

*Ключевые слова: композитная ткань, мехатроника, автоматизация.*

## ANALYSING THE PRODUCTION METHODS OF COMPOSITE FABRIC FOR SPACE AND AVIATION INDUSTRY

M. A. Agafonov\*, I. S. Kondakov, A. A. Pelymskaya, L. V. Ruchkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: mihail.agafonov.01@mail.ru

*The analysis of methods of composite fabric production by automated and semi-automated machines.*

*Keywords: composite fabric, mechatronics, automation.*

В ракетно-космической и авиационной промышленности широко развивается технология изготовления изделий из материалов, в состав которых входит углерод – композиты, углеродные ткани и т.п. Это вызвано необходимостью в получении прочных и лёгких деталей, способных выдержать экстремальные нагрузки и условия. Изделия могут изготавливаться как из заранее подготовленной ткани, так и вручную выкладываться из углеродных лент или нитей.

В композитном производстве применяются несколько типов рисунков углеродных тканей: однонаправленный, биаксиальный, триаксиальный, многоаксиальный и нетканый. Ткани подразделяются на однослойные и многослойные, а также на плоские или замкнутые в рукав. Выбор конкретного рисунка и фактора производства зависит от прилагаемых нагрузок и их распределения – углеродная ткань выдерживает усилие на разрыв во много раз лучше, чем в других направлениях. Для производства разных рисунков и формы исполнения ткани применяются приспособления разных видов, которые будут рассмотрены далее.

Для производства однонаправленной ткани применяют способ выкладки нескольких прядей лент углеволокна на удерживающую их поверхность или сетку, собранная в одно полотно, углеродная ткань наматывается на ролик в рулон [1]. Если необходимо придать однонаправленной ткани больше прочности на расслоение, то применяется технология рапирного ткацкого станка, показанного в патенте [2]. В нём, вместо углеродной ленты на рапире устанавливается связующая нить, удерживающая однонаправленные ленты углеволокна.

Также известны способы автоматического покрытия округлых изделий методом намотки на них углеродных лент. Такие способы могут применяться для изготовления продольной или поперечной намотки как, например, семикоординатный намоточный станок для «сухой» намотки препрегом или устройство косослойной продольно-поперечной намотки от компании «ВИУС» [3,4].

Технология рапирного станка может применяться и для биаксиальных однослойных тканей, для этого вместо связующей нити в рапире устанавливается лента углеволокна. Такая технология позволяет получить в биаксиальной ткани рисунки 2x2, 4x4, 4HS, 5HS, 8HS, показанные на рис. 1 и другие.

Чем меньше участки переплетений, тем выше стабильность ткани, но меньше формруемость, что может сказаться на качестве последующего техпроцесса.

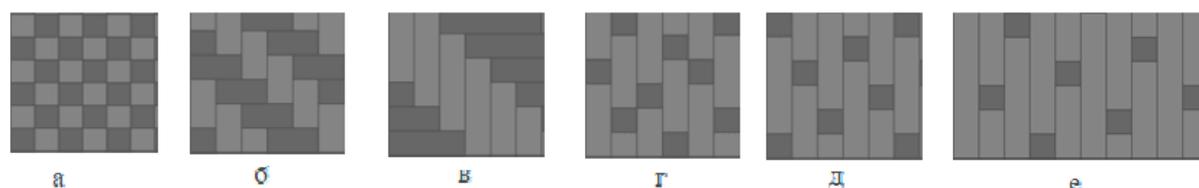


Рис. 1. Разновидности рисунков биаксиальной ткани  
(а – стандартное плетение, б – 2х2, в – 4х4, г – 4HS, д – 5HS, е – 8HS)

Для изготовления триаксиальных тканей применяется несколько способов. Первый из них применяется для создания многослойной ткани методом склейки нескольких листов ткани с заданным направлением. В станке листы перематываются так, что накладываются друг на друга с последующей склейкой с добавлением композитных материалов или сшиванием нитями. Данный способ можно применять и для многоаксиальных тканей.

Известен способ создания триаксиальной ткани с помощью радиальной оплёточной ячейки [5]. Данный способ заключается в перемещении шпулей с углеродными лентами циклично по периметру радиальной ячейки и их взаимной смене (для вплетания лент +60 и – 60 градусов, показанных на рис.2), а также закреплении продольных лент с помощью центрального диска (для вплетания лент 0 градусов). Данный способ отлично подходит для изготовления тканей в форме рукавов, но не может применяться для плоских тканей.

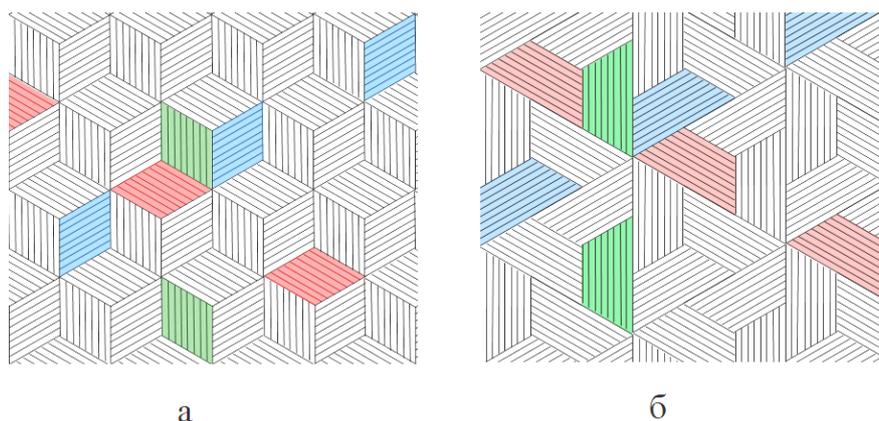


Рис. 2. Разновидности рисунков триаксиальной ткани  
(а – плотное плетение, б – облегчённое плетение)

Таким образом, не существует универсальной технологии для получения всех возможных вариантов плетения углеродной ткани. Необходимо определиться с типом рисунка и формфактором, а также с распределением нагрузок. Технология изготовления плоской триаксиальной ткани требует дальнейших исследований.

### Библиографические ссылки

1. Пат. №2628374С2 Российская Федерация, МПК В29В 15/12. Сухой волокнистый материал для дальнейшей пропитки смолой/ Д. Понсолле, К. Л. Рестучча, У Джейкобс, Р. Блэкберн, К. Лофаро, Р. Прайс, М. Дойл, М. Смит, М. Роман, А. Абусафих; заявитель и патентообладатель Сайтек Индастриз Инк. (США), Сайтек Энджиниэрд Матириалз Инк. (США). №2014115681; заявл. 17.01.12; опубл. 16.08.2017, Бюл. № 23, 27 с.
2. Пат. №2129625С1 Англия, МПК D03D47/27. Рапирный ткацкий станок/ заявитель и патентообладатель Ф. Шпайх (Англия). - №1996139729/14; заявл. 16.08.1994; опубл. 27.04.1999, Бюл. № 14. 7 с.
3. Семикоординатный намоточный станок для поперечной намотки [Электронный ресурс] // НПП «ВИУС». URL: <http://www.nppvius.ru/ru/product/semikoordinatnyy-namotchnyy-standok-dlya-suhoy-namotki-prepregom> (дата обращения: 11.09.2023).

4. Устройство косослойной продольно-поперечной намотки [Электронный ресурс] // НИИ «ВИ-УС». URL: <http://www.nppvius.ru/ru/product/ustroystvo-kososloynoy-prodolno-poperechnoy-namotki-kppn> (дата обращения: 12.09.2023).

5. Пат. 10870933B2 США, МПК D04C 3/36, D04C 3/48 Braiding machine and method of forming an article incorporating a moving object: № 16 / 379,493 : заявл. 2019.03.09 : опубл. 2020.11.22/ Robert M. Bruce, Eun Kyung Lee,; патентообладатель NIKE , Inc., 39 с.

#### References

1. Pat. No. 2628374C2 Russian Federation, МПК B29B 15/12. Dry fibre material for further impregnation with resin / D. Ponsolle, C. L. Restuccia, W. Jacobs, R. Blackburn, C. Lofaro, R. Price, M. Doyle, M. Smith, M. Roman, A. Abusafih; applicant and patentee - Sytek Industries Inc. (USA), Sytek Engineered Materials Inc. - No.2014115681; applied for. 17.01.12; published 16.08.2017, Bulletin No. 23, 27 p.

2. Pat. no. 2129625C1 England, МПК D03D47/27. Rapier weaving loom / applicant and patentee F. Speich (England). - №1996139729/14; avv. 16.08.1994; published 27.04.1999, Bulletin No. 14. 7 с.

3. Seven-coordinate winding machine for transverse winding [Electronic resource] // SPE "VIUS". URL: <http://www.nppvius.ru/ru/product/semikoordinatnyy-namotchnyy-standok-dlya-suhoy-namotki-prepregom> (date of address: 11.09.2023).

4. Device of oblique longitudinal-transverse winding [Electronic resource] // SPE "VIUS". URL: <http://www.nppvius.ru/ru/product/ustroystvo-kososloynoy-prodolno-poperechnoy-namotki-kppn> (date of address: 12.09.2023).

5. Pat. 10870933B2 USA, IPC D04C 3/36, D04C 3/48 Braiding machine and method of forming an article incorporating a moving object: No. 16 / 379,493 : applied. 2019.03.09 : published 2020.11.22/ Robert M. Bruce, Eun Kyung Lee, ; patentee NIKE , Inc., 39 p.

© Агафонов М. А., Кондаков И. С., Пелымская А. А., Ручкин Л. В., 2023

УДК 621.7.012

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ КА СЛОЖНЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТРАТЕГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПО НОРМАЛИ К ПОВЕРХНОСТИ

К. Г. Анисимова<sup>1,2\*</sup>, Е. А. Шангина<sup>1</sup>, Д. В. Стрижак<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: anisimovakseniia@gmail.com

*Пятиосевое фрезерование является одним из основных современных методов обработки деталей космического аппарата (КА). При серийном изготовлении необходима оптимизация затрат машинного времени с учётом сохранения требований конструкторской документации по шероховатости криволинейной поверхности.*

*Ключевые слова: фреза, четырехосевая обработка, пятиосевая обработка, фрезерование, криволинейная поверхность, оптимизация, по нормали к поверхности, шероховатость.*

## MILLING OPTIMIZATION IN NORMAL TO CURVE SURFACE STRATEGY FOR SPACECRAFT PARTS

K. G. Anisimova<sup>1,2\*</sup>, E. A. Shangina<sup>1</sup>, D. V. Strizhak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: anisimovakseniia@gmail.com

*Five axes milling is one of the central modern method of space vehicle part cutting. There was a problem of optimizing the machine time, taking into account the preservation of design documentation requirements for curved surface roughness in serial production.*

*Keywords: mill, four axes milling, five axes milling, milling, curved surfaces, optimization, normal to curve, roughness.*

С развитием современных САМ систем конструктора при проектировании деталей все чаще применяют криволинейные поверхности, которые позволяют минимизировать массу изделия при сохранении его прочностных характеристик. Примерами таких поверхностей служат корпуса и карманы фитингов [1], представленные на рис. 1.

Такие поверхности возможно выполнить, только применив 4-осевую или 5-осевую обработку на современных обрабатывающих центрах. Обработка данных поверхностей увеличивает требования к квалификации технолога – программиста, а также к выбору САМ системы для написания управляющей программы [2]. При 4-осевой и 5-осевой обработке по нормали, вращение детали в оси, перпендикулярной оси инструмента, [3] выпуклых поверхностей обычной концевой фрезой образуются продольные канавки, повторяющие углы торцевой поверхности фрезы согласно табл. 1. В связи с этим во многих справочниках режущего инструмента рекомендуется применять сферические фрезы для обработки криволинейных поверхностей, чаще всего применяются для чистовой обработки.

Возникает проблема увеличения машинного времени: при использовании сферической фрезы для получения требуемых параметров шероховатости, необходимо уменьшить шаг обработки - расстояние между проходами от 0,05 до 0,2, машинное время кратно возрастает и выходные параметры обработки часто не соответствуют заданным требованиям шероховатости поверхности, остаются «волны» согласно табл. 1.

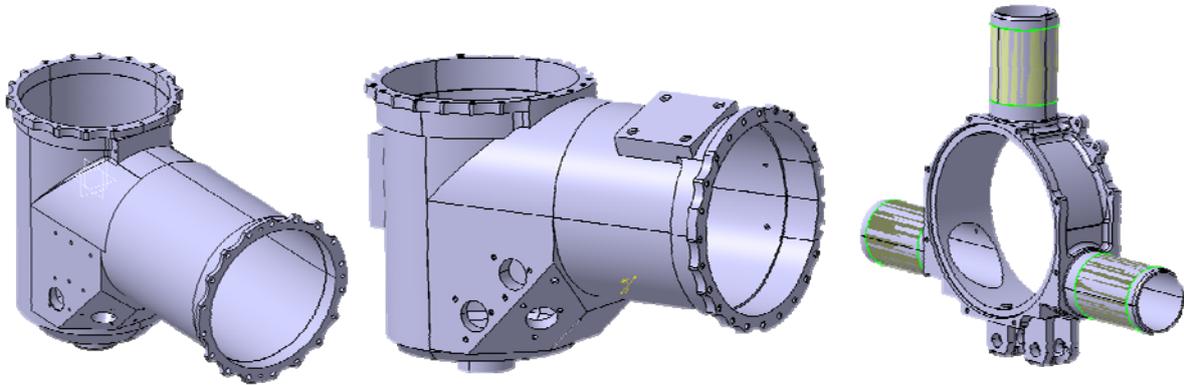
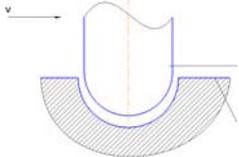
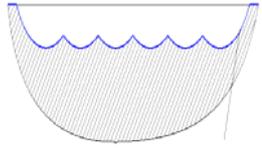
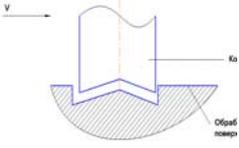
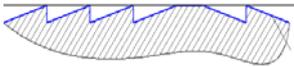
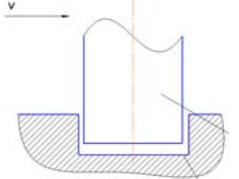
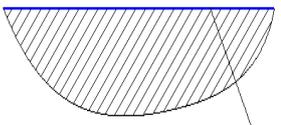
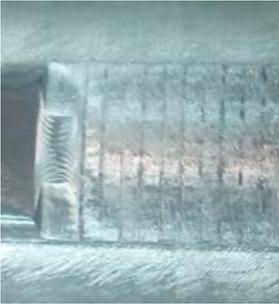


Рис. 1. Примеры криволинейных поверхностей для фрезерования у корпуса блока механической системы наведения антенн и фитинга для каркасов солнечных батарей или силовых спиц антенн и другие типы деталей, опоры, кронштейны

Таблица 1

## Сравнение результатов обработки различными типами фрез

Тип фрезы	Полученная чистовая поверхность схематически	Пример обработанных поверхностей деталей из алюминия/титана	Параметр шероховатости Ra, мкм
сферическая фреза 			5 и грубее
концевая фреза с поднутрением 			4,6-4,8
фреза с плоским торцом 			0,8

С учетом этой проблемы, была выпущена конструкторская документация на изготовление новой концевой фрезы, отвечающей заданным требованиям качества поверхности и оптимизированному времени на ее обработку.

На примере криволинейной поверхности двух одинаковых корпусов из партии деталей анализ экспериментальных данных по внедрению и отработке инструмента показал при неизменных режимах резания разное качество поверхности. В первом случае – обработка обычной концевой фрезой – шероховатость была Ra 5 минимум, и для ее улучшения оператор станка заново запускает цикл программы на обработку данной поверхности для достижения требуемого качества в соответствии с чертежом. Следовательно, для Rz 40 криволинейной поверхности обычной концевой фрезой требуется в 2 раза больше времени по программе. Во втором случае – обработка вновь спроектированной концевой фрезой – шероховатость достигает значения Ra0.8 или выше. Данный результат достигнут обработкой за один цикл программы для рассматриваемой поверхности. Третий случай – обработка сферической фрезой не рассмотрен в силу явного увеличения траектории инструмента более чем в 10 раз, что так же влияет на время написания самой программы технологом – программистом, расчет времени математических вычислений в программе. Результат эксперимента сведен в табл. 2 для наглядности преимуществ разработанной фрезы.

Таблица 2

Сравнительные результаты внедрения и отработки фрезы с плоским торцем

Тип фрезы	Обработанная поверхность	Шероховатость, мкм	Время обработки криволинейной поверхности, ч	Время достижения требований чертежа, ч
Стандартная концевая (с поднутрением)		Ra 100	0,5	1
С плоским торцем		Ra 0,2	0,5	0,5
Сферическая		Ra 6,3	5 (расчетное)	5

Выбор рассматриваемого инструмента проводится с целью [4]:

1. Расширения технологических возможностей механической обработки, улучшение технических характеристик фрезеруемых деталей за счёт:

- пятикоординатной обработки, позволяющей фрезеровать импеллерные поверхности деталей, необходимые для современных КА;

- возможности изготовления деталей с высокой шероховатостью без применения абразивного материала;

2. Снижение трудоёмкости изготовления детали за счёт [5]:

- уменьшения машинного, основного времени за счёт высокоскоростной обработки;

- высокоскоростной обработки, позволяющей исключать из технологического процесса операций по доведению требуемых в конструкторской документации параметров шероховатости деталей – финишная обработка на координатно – расточных станках, шлифование, полирование на токарных станках и ручное полирование.

С учетом проведенных работ, выбор рассмотренного в данной работе инструмента позволяет снизить время изготовления и повысить качество детали за счет оптимизации траектории резания.

### Библиографические ссылки

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т. 1. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 726 с.
2. Как работает 5-осевой фрезерный станок с ЧПУ. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtool.ru/stati/kak-rabotaet-5-osevoy-frezernyy-standok-s-chpu-ustroystvo-stanka-s-chpu-5-osey/> (дата обращения: 14.3.2023).
3. Строим умное производство вместе на примере совместных проектов компании «Солвер» и ОАО «Казанский вертолетный завод»/ Бирбраер Р.А., Лыков В.И., Бугаков И.С., Павлов Л.Н., Столповский В.В. // ИТО. Инструмент. Технология. Оборудование. 2006. №3 С.5-23.
4. Альтшулер И.Г., Бирбраер Р.А. Основы инженерного консалтинга: Технология, экономика, организация. М.: «Дело», 2007. 232 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 3-х т. Т. 1/Под ред. А. Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.

### References

1. Anyriev V. I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitela* [Machine builder constructor manual] Т. 1. Moscow, Mechanical engineering, 1979, 726 p.
2. *Kak rabotaet pyatiosevoi frezernui stanok s CHPU*. Available at: <https://3dtool.ru/stati/kak-rabotaet-5-osevoy-frezernyy-standok-s-chpu-ustroystvo-stanka-s-chpu-5-osey/> (accessed 14.3.2023).
3. *Stroim umnoe proizvodstvo vmeste na primere sovmestnykh proektov kompanii "Solver" i OAO "Kazansky vertoletnyi zavod"* [Building smart production together on the example of join projects "Solver" and OJSC "Kazan helicopters" companies]/ Birbraer R. A., Lukov V. I., Bugakov I. S., Pavlov L.N., Stolpovsky V.V. // *IТО. Instrument. Tehnologiya. Oborudovanie*. 2006. no. 3, p. 5-23 (In Russ.).
4. Altshuler I.G., Birbraer R.A. *Osnovy inzhenernogo konsaltinga: Tehnologiya, ekonomika, organizatsia* [Basics of engineering consulting: Technology, economy, organization]. Moscow, Delo Publ., 2007, 232 p.
5. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitela*. [Machine builder technologist manual] Т. 1./ Kosilova A.G., Mecsleriakov R.K. Moscow, Mechanical engineering, 1986, 656 p.

© Анисимова К. Г., Шангина Е. А., Стрижак Д. В., 2023

УДК 541.136

## МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

А. А. Артемьев\*, А. С. Гайдук, Н. С. Искров, Н. А. Сидун

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: artur.art15@yandex.ru

*В работе рассматриваются методы отслеживания параметров литий-ионных аккумуляторов.*

*Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, электрические транспортные средства, робот, неисправность.*

## METHODS FOR DIAGNOSING THE CONDITION OF A LITHIUM-ION BATTERY

A. A. Artemyev\*, A. S. Gaiduk, N. S. Iskroy, N. A. Sidun

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: artur.art15@yandex.ru

*The paper discusses methods for tracking the parameters of lithium-ion batteries.*

*Keywords: lithium-ion battery, electric vehicles, robot, malfunction.*

**Введение.** Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) стали неотъемлемой частью современной жизни, обеспечивая энергией множество устройств, от мобильных телефонов и ноутбуков до электромобилей и систем хранения энергии. Однако, как и любые другие аккумуляторы, литий-ионные аккумуляторы подвержены старению и износу, что может привести к снижению их производительности и даже выходу из строя.

Для обеспечения надежности и продолжительности работы ЛИА необходимо проводить регулярную диагностику их состояния.

**Измерения необходимые для диагностики литий-ионного аккумулятора.** Для диагностики литий-ионного аккумулятора необходимо измерить:

- напряжение на клеммах;
- ёмкость аккумулятора;
- сопротивление (импеданс) аккумулятора;
- температура аккумулятора;
- вибрации и удары.

**Методы проведения измерений.** Существует несколько методов проверки литий-ионных аккумуляторов. Один из них – это проверка напряжения на клеммах. Для этого используют вольтметр, который подключают к клеммам аккумулятора. Затем смотрят на показания вольтметра и определяют, заряжен ли аккумулятор.

Также можно проверить емкость аккумулятора. Для этого аккумулятор полностью заряжают, а затем разряжают с помощью нагрузки. После этого измеряют время, за которое аккумулятор разрядился, и сравнивают его с номинальной емкостью аккумулятора.

Кроме того, можно проверить сопротивление (импеданс) аккумулятора. Для этого используют омметр, который подключают к аккумулятору и измеряют его сопротивление. Если сопротивление слишком высокое, то это может указывать на проблемы с аккумулятором.

Температуру аккумулятора также можно проверить с помощью термометра. Высокая температура может указывать на проблемы в работе аккумулятора.

Вибрации и удары аккумулятора можно проверить с помощью вибростенда или ударного стенда. Если аккумулятор подвергается сильным вибрациям или ударам, это может привести к его повреждению.

**Подведение итогов диагностики.** Если напряжение на клеммах литий-ионного аккумулятора становится слишком низким, это может указывать на его неисправность. Также если емкость аккумулятора становится значительно ниже номинальной, это может быть признаком его неисправности. Кроме того, если сопротивление аккумулятора становится слишком высоким или температура становится слишком высокой, это также может указывать на неисправность аккумулятора.

Диагностика состояния литий-ионного аккумулятора является важным процессом, который позволяет определить его текущее состояние, выявить возможные проблемы и предотвратить преждевременный износ. Существует несколько параметров, которые можно использовать для диагностики, включая напряжение на клеммах, емкость аккумулятора, сопротивление (импеданс), состояние электродов и остаточный ресурс аккумулятора. Проверка этих параметров позволяет получить информацию о состоянии аккумулятора и принять необходимые меры для обеспечения его надежной работы.

### Библиографические ссылки

1. Патент № 2287836 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/36, H01M 10/48. Устройство непрерывного контроля электрических характеристик аккумулятора : № 2005108784/28 : заявл. 28.03.2005 : опубл. 20.11.2006 / Д. А. Сергеев, Д. Д. Сергеев, О. И. Касаткина ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)".

2. Болдырев, Н. А. Прибор для диагностики литиевых аккумуляторов / Н. А. Болдырев, А. В. Иванов // Молодые ученые развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2023. № 1. С. 862-863.

3. Патент № 2784095 С1 Российская Федерация, МПК A62C 5/033. Способ тушения и/или предотвращения пожара, включая возгорание литий-ионных аккумуляторов : № 2022115452 : заявл. 08.06.2022 : опубл. 23.11.2022 / В. В. Колчин, В. Г. Демидов, А. Б. Жданович [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Системы Пожаротушения".

### References

1. Patent No. 2287836 C1 Russian Federation, IPC G01R 31/36, H01M 10/48. Device for continuous monitoring of electrical characteristics of the battery : No. 2005108784/28 : application 28.03.2005 : publ. 20.11.2006 / D. A. Sergeev, D. D. Sergeev, O. I. Kasatkina ; applicant State Educational Institution of Higher Professional Education "South Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute)".

2. *Pribor dlya diagnostiki litiyevykh akkumulyatorov* [Device for diagnostics of lithium batteries] / N. A. Boldyrev, A.V. Ivanov // Young scientists development of the National Technological Initiative (SEARCH). 2023. No. 1. p. 862-863.

3. Patent No. 2784095 C1 Russian Federation, IPC A62C 5/033. Method of extinguishing and/or preventing fire, including ignition of lithium-ion batteries : No. 2022115452 : application 08.06.2022 : publ. 23.11.2022 / V. V. Kolchin, V. G. Demidov, A. B. Zhdanovich [et al.] ; applicant Limited Liability Company "Fire Extinguishing Systems".

© Артемьев А. А., Гайдук А. С., Искров Н. С., Сидун Н. А., 2023

УДК 621.763

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ФРЕЗОТочЕНИИ

А. С. Бинчуров<sup>1,2\*</sup>, Н. И. Усевич<sup>2</sup>, Ю. И. Гордеев<sup>1</sup>, К. А. Мельчуков<sup>2</sup>, С. В. Филиппов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26.

<sup>2</sup>Аэрокосмический колледж Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: [mexanixs@mail.ru](mailto:mexanixs@mail.ru)

*Исследованы возможности и обосновано повышение качества обработки сложнопрофильных поверхностей за счет моделирования процессов фрезоточения.*

*Ключевые слова: фрезоточение, РК-профиль, технологические параметры.*

## STUDY OF THE PROCESSES OF FORMATION OF MICRO-DIMENSIONS ON THE SURFACES OF PARTS DURING MILLING

A. S. Binchurov<sup>1,2\*</sup>, N. I. Usevich<sup>2</sup>, Y. I. Gordeev<sup>1</sup>, K. A. Melchukov<sup>2</sup>, S. V. Filippov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: [mexanixs@mail.ru](mailto:mexanixs@mail.ru)

*The possibilities are investigated and the improvement of the quality of processing of complex-profile surfaces is justified by modeling milling processes.*

*Keywords: milling, RC-profile, technological parameters.*

Активное использование современных 3-5 осевых многоцелевых станков с ЧПУ открывает расширенные технологические возможности для обработки сложнопрофильных деталей с высокой производительностью и точностью. Особый интерес вызывает обработка сложнопрофильных поверхностей деталей из труднодеформируемых материалов к которым предъявляются повышенные требования по качеству обработки [1-5].

На рис. 1 изображена схема фрезоточения РК-профильной поверхности.

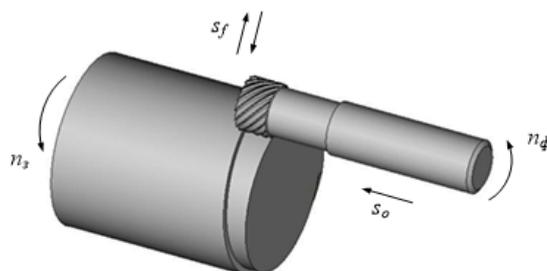


Рис. 1. Схема обработки поверхностей при фрезоточении

В процессе обработки детали по методу фрезоточения инструмент совершает два движения: поступательное вдоль оси детали ( $s_o$ ) и вращательное движение вокруг собственной оси ( $n_\phi$ ), а обрабатываемая заготовка, при этом вращается вокруг собственной оси ( $n_o$ ).

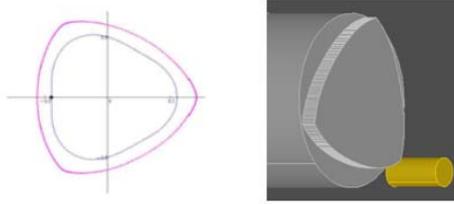


Рис. 2. Профили поверхностей деталей

По результатам численных оценок по первой схеме торцевого фрезоточения были разработаны комплексная методика и расчетные формулы для определения основных режимов резания.

Описание движений инструмента и детали представлено в виде системы уравнений (1) и матрицы вращения детали (2). Например, при соотношении угловых скоростей 1/3:  $\omega_1 = 2\pi 3$ ,  $\omega_D = -2\pi$ , где  $\omega_1$  – угловые скорости инструмента,  $\omega_D$  – угловые скорости детали.

$$r_1(t, \delta\varphi) = \begin{pmatrix} r_{10} \cos(s_1 t + \delta\varphi) + s \\ 0 \\ r_{10} \cos(s_1 t + \delta\varphi) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Mz(t) = \begin{pmatrix} \cos(\omega_D t) & -\sin(\omega_D t) & 0 \\ \sin(\omega_D t) & \cos(\omega_D t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

где  $r_1$  – координаты точек перемещения инструмента;  $\delta\varphi$  – расстояние между режущими кромками;  $\varepsilon$  – отношение радиусов фрезы и заготовки.

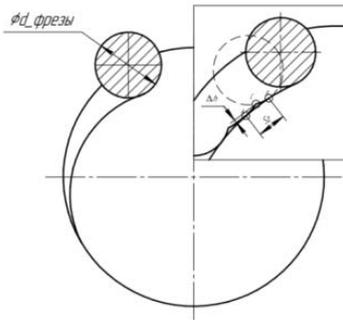


Рис. 3. Расчётная схема определения остаточной микронеровности

Результаты моделирования показывают, что фрезоточение позволяет получать различные профили на детали (рис. 3). Примеры профилей и шероховатости поверхности, полученных фрезерованием при различных значениях числа зубьев ( $N$ ), угловых скоростей инструмента ( $\omega_1$ ) и заготовки ( $\omega_D$ ), расстояний между осью инструмента и деталью ( $\varepsilon$ ). При фрезеровании высота расчетных неровностей определяется положением точки  $p$ , пересечения двух окружностей, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном подаче  $Sz$  на зуб фрезы.

Естественно, реальные микронеровности по форме и высоте отличаются от расчетных.

По сравнению с расчетным реальный микропрофиль теряет свою регулярность и  $R_z \ll \Delta h$ .

$$\Delta h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{S_z^2}{4}} \quad (3)$$

Численные эксперименты с использованием программных продуктов MathCAD и основанные на аналитических положениях, предложенных в работе, позволили оценить влияние режимов резания, геометрических параметров режущей части инструмента (профиля и количества зубьев), кинематики относительного перемещения в системе «инструмент – деталь» на форму поверхностей и параметры контура шероховатости, получаемые при фрезоточении.

#### Библиографические ссылки

1. DeOliveira F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Т. 89. С. 39-54.
2. Chuzhoy L., Devor R.E., Kapoor S.G., et al. Microstructure-level modeling of ductile iron machining. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2002, vol. 124, no. 2, pp. 162–169. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1455642>
3. Binchurov A. S. et al. Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (IOP Publishing 537 № 3) 2019. p 032101. doi:10.1088/1757-899X/537/3/032101
4. Гордеев, Ю. И. Влияние кинематических и технологических параметров ротационного точения многогранными резаками на формирование стружки и шероховатость поверхности / Ю. И. Гордеев, Н. С. Индаков, А. С. Бинчуров, Д. И. Киселев, В. Б. Ясинский. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18. №. 2. С. 379-386.
5. Патраев Е.В., Вакулин М.С., Гордеев Ю.И., Ясинский В.Б. Высокоскоростное микрофрезерование деталей из композиционных материалов и алюминиевых сплавов. *Известия ВУЗов Машиностроение* №12(741). 2021. с. 62-72.

#### References

1. DeOliveira F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 89. pp. 39-54.
2. Chuzhoy L., Devor R.E., Kapoor S.G., et al. Microstructure-level modeling of ductile iron machining. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2002, vol. 124, no. 2, pp. 162–169. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1455642>
3. Binchurov A. S. et al. Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (IOP Publishing 537 № 3) 2019. p 032101. doi:10.1088/1757-899X/537/3/032101
4. Gordeev, Yu. I. Influence of kinematic and technological parameters of rotary turning with polyhedral cutters on chip formation and surface roughness / Yu. I. Gordeev, N. S. Indakov, A. S. Binchurov, D. I. Kiselev, V. B. Yasinsky. // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 18. no. 2. С. 379-386.
5. Patraev E.V., Vakulin M.S., Gordeev Yu.I., Yasinsky V.B. High-speed micro milling of parts made of composite materials and aluminum alloys. *Izvestiya VUZov Mashinostroenie* No.12(741). 2021. pp. 62-72.

© Бинчуров А. С., Усевич Н. И., Гордеев Ю. И., Мельчуков К. А., Филиппов С. В., 2023

УДК 621.791.725

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ЗАГОТОВКИ ГИБКОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СЕКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. С. Вервейко<sup>1</sup>, А. В. Мурыгин<sup>2</sup>, С. К. Злобин<sup>1</sup>, В. Ю. Гусев<sup>1</sup>, Р. В. Зайцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: verveykods@iss-reshetnev.ru

*В настоящее время на предприятии АО «РЕШЕТНЕВ» имени академика М. Ф. Решетнева ведутся исследования по разработке математической модели импульсной лазерной сварки заготовок гибких волноводных секций космических аппаратов из материала БрБ2 толщиной 0,1 мм.*

*Ключевые слова: математическая модель, допущения, гибкая секция, герметичность, лазерная сварка.*

## MATHEMATICAL MODELING OF LASER WELDING OF A BILLET OF A FLEXIBLE WAVEGUIDE SECTION OF A SPACECRAFT

D. S. Verveyko<sup>1</sup>, A. V. Murugin<sup>2</sup>, S. K. Zlobin<sup>1</sup>, V. U. Gusev<sup>1</sup>, R. V. Zaitsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: verveykods@iss-reshetnev.ru

*Currently, research is underway at the Academician M. F. Reshetnev ISS JSC to develop a mathematical model of pulsed laser welding of blanks of flexible waveguide sections of spacecraft made of 0.1 mm thick BrB2 material.*

*Keywords: mathematical model, assumptions, flexible section, tightness, laser welding.*

Одним из способов повышения конкурентоспособности предприятия в области космической связи является снижение себестоимости производства космических аппаратов (КА). Серийное изготовление КА – высокотехнологичный сектор экономики, где постоянно применяются новые конструкторские и технологические решения.

Предприятие АО «РЕШЕТНЕВ» проводит отработку технологии нового способа изготовления заготовки гибкой волноводной секции КА. Способ включает лазерную сварку механически обработанной листовой заготовки толщиной 0,1 мм из материала БрБ2 ДПРНМ ГОСТ1789-13. Формирование нестандартного сварного соединения происходит в специальном приспособлении, которое обеспечивает плотное прилегание кромок и внутренние размеры трубы. При изготовлении заготовок гибких волноводных секций новым способом, технические требования по размерам внутреннего канала и прочности стенки трубы остаются такими же, как и при изготовлении с применением способами обработки давлением (раскатка и вытяжка).

Отработка технологии включает два этапа: построение и анализ математической модели процесса импульсной лазерной сварки заготовки и сварку образцов.

Необходимость построения математической модели обусловлено снижением затрат на образцы. Расчётно-аналитическими методами рассчитывается диапазон режимов сварки исключая образование

дефектов. Основной причиной образования дефектов в тонкостенных деталях является избыточное тепловложение при воздействии лазерного излучения. Полученные режимы позволяют использовать минимальное количество образцов для подтверждения качества сварного соединения.

Рассмотрение литературы о процессе лазерной сварки показал [1-4], что имеются разработанные математические модели, критерии и принципы оптимизации, позволяющие с достаточной достоверностью и точностью определить численно оптимальные режимы процесса сварки, в том числе и импульсной. В качестве главных технологических параметров являются: глубина проплавления, ширина шва, скорость обработки, теплофизические свойства материала и параметры лазерного излучения (средняя выходная мощность, энергетическая расходимость и диаметры луча на выходном окне излучателя).

В настоящий момент на предприятии АО «РЕШЕТНЁВ» разрабатывается математическая модель процесса импульсной лазерной сварки заготовки гибкой волноводной секции толщиной 0,1 мм из медного сплава. Модель позволит провести не только качественный анализ температурных полей, но и дать количественную оценку особенностям термических циклов, скоростей охлаждения, максимальных температур и других тепловых параметров.

### Библиографические ссылки

1. Григорянц А. Г. Лазерная сварка металлов: учебное пособие для вузов. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. 207 с.
2. Рыкалин Н. Н., Углов А. А. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М: Машиностроение, 1985. 496 с.
3. Волченко В. Н. Теория сварочных процессов: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.
4. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 504 с.

### References

1. Grigoryants A. G. *Lazernaya svarka metallov: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moskva; Berlin: Direkt-Media, 2021. 207 s.
2. Rykalin N. N., Uglov A. A. *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov*. M: Mashinostroenie, 1985. 496 s.
3. Volchenko V. N. *Teoriya svarochnykh protsessov: uchebnoe posobie dlya vuzov*. M.: Vysshaya shkola, 1988. 559 s.
4. D'yuli U. *Lazernaya tekhnologiya i analiz materialov*: Per. s ang. M.: Mir, 1986. 504 s.

© Вервейко Д. С., Мурыгин А. В., Злобин С. К., Гусев В. Ю., Зайцев Р. В., 2023

УДК 541.136

## ПАРАМЕТРЫ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

А. С. Гайдук\*, А. А. Артемьев, Н. С. Искров, Н. А. Сидун

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: alinagaiduk@bk.ru

*В работе рассматриваются необходимые для отслеживания параметры литий-ионных аккумуляторов.*

*Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, электрические транспортные средства, робот, неисправность.*

## DIAGNOSTIC PARAMETERS FOR DETECTING LITHIUM-ION BATTERY MALFUNCTION

A. S. Gaiduk\*, A. A. Artemyev, N. S. Iskrov, N. A. Sidun

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: alinagaiduk@bk.ru

*The paper discusses the necessary parameters for tracking lithium-ion batteries*

*Keywords: lithium-ion battery, electric vehicles, robot, malfunction.*

**Введение.** Диагностика литиевых аккумуляторов является важным процессом, который позволяет определить состояние и производительность аккумулятора. Литиевые аккумуляторы широко используются в портативных электронных устройствах, электромобилях и солнечных системах хранения энергии [1].

Для диагностики литиевых аккумуляторов применяются различные методы и техники.

**Измерение напряжения и тока литий-ионных аккумуляторов.** Такие параметры, как напряжение и сила тока, могут дать информацию о состоянии заряда и разряда аккумулятора. Анализ данных параметров может указать на наличие повреждения или неисправности аккумулятора [2]. Во-первых, увеличение значений тока и напряжения приводит к некорректной работе литиевого аккумулятора, что вызывает перегрев. Высокая температура аккумулятора-одна из главных причин возникновения возгорания. Для одной ячейки литиевого аккумулятора номинальное напряжение около 3.8В, если значение увеличивается более 4В, это указывает на потенциальную проблему с аккумулятором.

**Измерение внутреннего сопротивления литий-ионных аккумуляторов.** Низкое внутреннее сопротивление аккумулятора является показателем хорошей работоспособности аккумулятора. Критическое значение внутреннего сопротивления зависит от конкретного аккумулятора, но в целом значения выше 50 миллиом (мОм) считаются высокими и могут указывать на неисправность аккумулятора [2].

**Измерение температуры литий-ионных аккумуляторов.** Критические значения температуры для литиевых аккумуляторов могут варьироваться в зависимости от конкретного типа аккумулятора и его конструкции [3]. Однако, значения выше 60-70°C считаются критическими и могут привести к нарушению герметизации аккумулятора и его возгоранию.

**Измерение выделяемых веществ литий-ионных аккумуляторов.** Во время горения или перегрева литий-ионных аккумуляторов выделяются вещества, которые не только свидетельствуют о неисправности аккумулятора, но и могут быть опасными для окружающих. При перегреве или повреждении аккумулятора могут выделяться: горючий газообразный литий, полимеры, электролиты или

сепараторы, токсичные газы (фтористый углерод, оксиды литий и углерода и др.) и другие токсичные вещества, содержащиеся в дыме, парах и твердых частицах.[4]

Диагностика неисправности литиевого аккумулятора включает в себя измерение напряжения, емкости и внутреннего сопротивления, контроль температуры, анализ скорости заряда и разряда. Эти параметры позволяют оценить состояние аккумулятора и определить возможные неисправности [4].

Важно отметить, что значения у разных видов аккумуляторов являются общими, и всегда следует обращаться к руководству пользователя или спецификации аккумулятора от производителя для получения точной информации о критических значениях параметров и рекомендациях по безопасности.

Определение неисправностей литиевых аккумуляторов крайне важно, поскольку аккумулятор с дефектами может привести к понижению времени автономной работы устройств, повреждению системы или даже возникновению пожара [4]. Поэтому только комплексная оценка параметров литий-ионных аккумуляторов может дать точный результат о его состоянии.

### Библиографические ссылки

1. Асирбабаян, А. А. Аккумуляторы: принцип действия. Промышленные аккумуляторы / А. А. Асирбабаян, А. В. Соломичева, А. С. Керимова // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе : Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 19–20 мая 2017 года. Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "СЕКВОЙЯ", 2017. С. 5-6.

2. Патент № 2287836 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/36, H01M 10/48. Устройство непрерывного контроля электрических характеристик аккумулятора : № 2005108784/28 : заявл. 28.03.2005 : опубл. 20.11.2006 / Д. А. Сергеев, Д. Д. Сергеев, О. И. Касаткина ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)".

3. Чудинов, Е. А. Характеристики литий-ионного аккумулятора с диоксидом серы / Е. А. Чудинов, О. В. Карлова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2010. Т. 53, № 5. С. 93-97.

4. Болдырев, Н. А. Прибор для диагностики литиевых аккумуляторов / Н. А. Болдырев, А. В. Иванов // Молодые ученые развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2023. № 1. С. 862-863.

### References

1. *Akkumulyatory: printsip deystviya. Promyshlennyye akkumulyatory* [Physico-technical problems of creating new technologies in the agro-industrial complex / Asirbabayan, A. A. Accumulators: the principle of operation. Industrial accumulators] / A. A. Asirbabayan, A.V. Solomicheva, A. S. Kerimova // A collection of scientific articles based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Stavropol, May 19-20, 2017. Stavropol: SEQUOIA Limited Liability Company, 2017. p. 5-6.

2. Patent No. 2287836 C1 Russian Federation, IPC G01R 31/36, H01M 10/48. Device for continuous monitoring of electrical characteristics of the battery : No. 2005108784/28 : application 28.03.2005 : publ. 20.11.2006 / D. A. Sergeev, D. D. Sergeev, O. I. Kasatkina ; applicant State Educational Institution of Higher Professional Education "South Russian State Technical University (Novochechassk Polytechnic Institute)".

3. *Kharakteristiki lityi-ionnogo akkumulyatora s dioksidom sery* [Characteristics of a lithium-ion battery with sulfur dioxide] / E. A. Chudinov, O. V. Karlova // News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2010. Vol. 53, No. 5. p. 93-97.

4. *Pribor dlya diagnostiki lityevykh akkumulyatorov* [Device for diagnostics of lithium batteries] / N. A. Boldyrev, A.V. Ivanov // Young scientists development of the National Technological Initiative (SEARCH). 2023. No. 1. p. 862-863.

УДК 67.02

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАТЫ ИЗ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА С ПОКРЫТИЕМ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПЛЕНКОЙ

М. Е. Гераськина, В. А. Бакач

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: geraskiname@iss-reshetnev.ru

*В данной статье описано фрезерование стеклотекстолита с покрытием медной фольгированной пленкой толщиной 50 мкм. По результатам проведенной работы сформулированы выводы и рекомендации.*

*Ключевые слова: плата, медный проводник, фрезерование, стеклотекстолит, приспособление.*

## PRODUCTION OF A BOARD MADE OF FIBERGLASS COATED WITH FOIL FILM

M. E. Geraskina, V. A. Bakach

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: geraskiname@iss-reshetnev.ru

*This article describes the milling of fiberglass coated with a copper foil film with a thickness of 50 microns. Based on the results of the work carried out, conclusions and recommendations were formulated.*

*Keywords: board, copper conductor, milling, fiberglass, fixture.*

Не редко к деталям в конструкторской документации (КД) применяются ужесточенные требования по допускам и техническим требованиям. В данном случае необходимо изготовить спиралеобразный проводник крупногабаритной платы космического аппарата из материала СФ-1-50Г-3,0 ГОСТ 10316-78 (стеклотекстолит с покрытием фольгированной пленкой). Основными затруднениями в КД были следующими:

- габаритные размеры платы 747,3x747,3 мм без выполнения сборочных работ;
- толщина платы 50 мкм;
- допуск плоскостности детали.

Для изготовления спиралеобразного проводника из материала СФ-1-50Г-3,0 ГОСТ 10316-78 использовался лист из стеклотекстолита. Механическую обработку проводили на портально-фрезерном обрабатывающем центре (рис. 1).



Рис. 1. Портально-фрезерный обрабатывающий центр

Но прежде чем начать механическую обработку детали, необходимо подобрать или изготовить СТО (специальная технологическая оснастка), в данном случае цехом было изготовлено специальное приспособление для механической обработки листа из стеклотекстолита (рис. 2).



Рис. 2. Специальное приспособление для механической обработки заготовки

Дополнительно заготовку выровняли и зафиксировали по краям прижимами. При установке образца в приспособление происходит изменение плоскости поверхности в зависимости от места постановки и силы фиксации зажимов. Разность высот составляла 0,5 мм, для уменьшения разности высот выполнили 4 отверстия диаметром 3,2 мм, затем расточили фрезой до диаметра 4,5 на глубину 1 мм в центре платы (согласно КД) и зафиксировали центральную часть винтами. Повторили измерения щупом, разница высот изменилась до 0,371. Для уменьшения допуска подложили в двух местах бумагу под плату, затем снова закрепили прижимами. При очередном измерении, максимальная разница высот стала 0,184 мм, понизили ноль станка на 0,09 мм [1-3].

Спустя 3 часа фрезерования выявлены явные неровности граней фольги вследствие износа фрезы. При измерении в нескольких местах глубины канавки штангенциркулем результаты находились в диапазоне 0,2 – 0,7 мм. Допуск  $\pm 0,1$ , согласно КД, получить не удалось, вследствие неровности поверхности листа и недостаточного прижатия заготовки. Необходимо учесть, что при фрезеровании противоположной поверхности без покрытия фольгированной пленкой снимается материал на 1,7 мм и остается 1,3 мм на поверхность с канавками. Соответственно при фрезеровании канавок на глубину 0,3-0,6 мм, будет оставаться неравномерная толщина платы с более тонкими местами 1-0,7 мм, тогда плата получится более хрупкой.

После фрезерования образовались не равномерные края фольгированного покрытия. Для дальнейшего изготовления детали необходимо перевернуть ее, это изменит показатели высот поверхности и плату нельзя будет обработать по допуску  $\pm 0,1$  со стороны без фольгированной пленки [4]; потребуется около 4 часов для правильной фиксации зажимов и измерений плоскостности обрабатываемой поверхности. После измерений получили плоскостность 0,2 мм. Фрезерование поверхности производили по одному карману, перед каждым обнуляли станок по месту обработки поверхности (рис. 3).

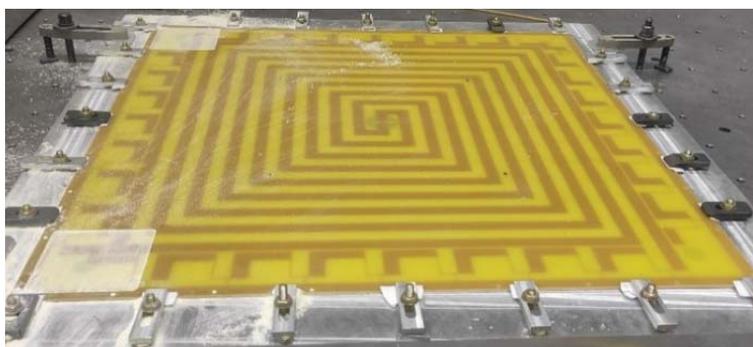


Рис. 3. Фрезерование поверхности с карманами на образце платы из стеклотекстолита СФ-1-50Г-3,0 ГОСТ 10316-78 на станке

После окончания фрезерования, для подтверждения соответствия выполненных размеров, плату отправили на контрольно-измерительную машину, для измерения основных размеров. Так как размер платы 747,3 на 747,3 мм, а максимальный размер поверхности для измерения 600 на 650 мм, то измерения проводились выборочно на части платы. По результатам измерений выявлено, что большинство размеров выходит за поля допусков [5]. На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы и рекомендации:

- чтобы соответствовать требуемому допуску по КД на глубину фрезерования, необходимо обеспечить плоскостность заготовки 0,1 с обеих сторон. По результатам изготовления, плата выходит за рамки требуемых допусков на глубину фрезерования, что не влияет на проводящую способность спиралеобразного проводника;

- для получения лучшего результата требуется приобретение вакуумного стола для портально-фрезерного обрабатывающего центра;

- добавить точки крепления заготовки к оснастке.

### Библиографические ссылки

1. Блюиберг В.А., Заозерский Е.И. Справочник фрезеровщика. Л.: Машиностроение, 1984. 288 с.
2. Рябов С.А. Современные фрезерные станки и их оснастка: учеб. пособие. Кемерово; КГТУ, 2006. 102 с.
3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания / А. Д. Локтев, И. Ф. Гущин, В.А. Батуев и др. // Справочник: В 2-х т.: Т. 1– М.: Машиностроение, 1991. 640 с.
4. Вереина Л.И. Выполнение работ по профессии «Фрезеровщик»: учеб пособие для студ. учреждений сред. проф. образования 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2016. 160 с.
5. Под ред. Косиловой А.Г. и Мешерякова Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/ 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

### References

1. Bluiberg V.A., Zaozersky E.I. Handbook of a milling cutter. L.: Mechanical engineering, 1984. 288 p.
2. Ryabov, S. A. Modern milling machines and their equipment: textbook. Manual. Kemerovo; KGTU, 2006. 102 p.
3. General machine-building standards of cutting modes: Handbook: In 2 volumes: Vol. 1/A.D. Loktev, I. F. Gushchin, V.A. Batuev, etc. M.: Mashinostroenie, 1991. 640 p.
4. Vereina L.I. Performance of work in the profession of "Milling machine operator": textbook for students. institutions sred. Prof. Education 2nd ed., ster. M.: Publishing Center "Academy", 2016. 160 p.
5. Handbook of a machine-building technologist. In 2 vols. Vol. 2/Edited by A.G. Kosilova and R.K. Meshcheryakov. 4th ed., reprint. and additional M.: Mechanical Engineering, 1985. 496 p.

© Гераськина М. Е., Бакач В. А., 2023

УДК: 629.7.064.5; 629.78.05; 89.25.21

**МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ  
ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ**

А. А. Гришин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: grishin\_aa@list.ru

*По предложенным методикам выполнены расчеты колец токосъемного устройства, применяемого в космических аппаратах типа ЭКСПРЕСС, которые показали работоспособность методик и позволили обеспечить требуемый срок службы контактных колец и их надежность.*

*Ключевые слова: кольцевое токосъемное устройство, контактное кольцо, прочность, пластичность, малоцикловая усталость, надежность, вероятность безотказной работы.*

**METHOD OF ANALYTICAL CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE  
OF CONTACT RINGS OF CURRENT-COLLECTING DEVICES**

A. A. Grishin

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: grishin\_aa@list.ru

*According to the proposed methods, calculations of the rings of the current-collection device used in EXPRESS-type spacecraft were performed, which showed the operability of the methods and allowed to ensure the required service life of the contact rings and their reliability.*

*Keywords: ring current collector, contact ring, strength, plasticity, low cycle fatigue, reliability, probability of trouble-free operation.*

Кольцевые токосъемные устройства служат для передачи электрической энергии от вращающихся частей к неподвижному основанию в различной технике, например, во вращающихся солнечных батареях, поворотных платформах и т. д. [1-5]. Обеспечение требуемой надежности работы кольцевого токосъемного устройства в течении заданного срока службы во многом зависит от условий работы его элементов, в частности, контактных колец. Базовый материал и материалы покрытий контактных колец податливы и имеют малые значения пределов текучести, что приводит к быстрому росту напряжений в контактных кольцах, которые могут превысить предел текучести его материала даже при относительно небольших прижимных силах.

Ситуация усугубляется для ответственных конструкций, таких как космические аппараты связи, которые должны работать в автономном режиме в течение длительного времени на орбите (10-12 лет и более).

Вместе с тем, если требуемое число циклов нагружения контактных колец относительно невелико, то пластическое нагружение их материала вполне возможно за счет использования области малоциклового усталости на кривой Веллера. Для этого в данной работе предложены методы аналитического расчета напряженно-деформированного состояния кольца токосъемного устройства, которые позволяют определить уровень действующих напряжений и обеспечить требуемый ресурс колец с заданной вероятностью безотказной работы. Корректность предложенного подхода обеспечивается использованием известных положений теории усталости и теории надежности при расчете механических систем.

Для описания поведения материала кольца из цветных и драгоценных материалов под нагрузкой примем модель идеального упруго-пластического материала. В этом случае оценка состояния материала сводится к проверке достижения значения максимальных нормальных напряжений величины его предела текучести.

При сжатии контактного кольца в нем возникает комплекс силовых факторов и соответствующих им напряжений. Проведенные предварительные исследования [1] показали, что контактные кольца работают в условиях поперечного изгиба от силы  $F$  и определяющим в их напряженном состоянии являются изгибные нормальные напряжения.

В процессе функционирования токосъемного устройства, каждое его контактное кольцо непрерывно перекачивается по поверхностям наружного и внутреннего колец, поэтому каждая точка кольца подвергается воздействию переменных напряжений, которые циклически изменяются во времени от нуля до предела текучести материала с соответствующим знаком. При циклическом нагружении прочность материала оценивается по коэффициенту запаса по усталостной прочности на основе кривой усталости Веллера, определяющей зависимость предела выносливости материала от числа циклов нагружения.

Надежность контактных колец в пластическом состоянии определим вероятностью его безотказной работы. Используя приближенное представление функции Лапласа, выражение для вероятности разрушения примет вид степенного ряда:

$$P_{разр} = \frac{\nu_{\Delta\sigma}}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(\frac{1}{2\nu_{\Delta\sigma}^2}\right)} \cdot (1 - \nu_{\Delta\sigma}^2 + 3\nu_{\Delta\sigma}^4 - \nu_{\Delta\sigma}^6 + \dots), \quad (1)$$

а вероятность безотказной работы равна

$$P_{без} = 1 - P_{разр} \quad (2)$$

По полученным зависимостям выполним расчеты долговечности и вероятности безотказной работы для контактных колец токосъемного устройства космического аппарата типа ЭКСПРЕСС. Для этого примем следующие исходные данные:  $R_1=30\text{мм}$ ,  $R_2=25\text{мм}$ ,  $r=9,9\text{мм}$ ,  $S=0,36\text{мм}^2$ ,  $\Delta=0,4\text{мм}$ . Материал: бронзовый сплав БрБ2,  $\sigma_{-1}=591\text{МПа}$ .

Расчет силовых факторов дает значения  $W=6,25 \cdot 10^{-9}\text{ м}^3$ ,  $J=1,56 \cdot 10^{-11}\text{ м}^4$ ,  $F=5\text{Н}$ ,  $M_{max}=0,008\text{ Н}\cdot\text{м}$ . Используя эти значения, получаем результаты расчета контактного кольца на усталостную прочность, представленные в таблице 1.

Таблица 1

#### Результаты расчета на усталостную прочность контактного кольца

Натяг кольца $\Delta$ , мм	$\sigma_{MIN}$ , МПа	$\sigma_{MAX}$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_a$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$K_\sigma$	$K_d$	$\beta_\sigma$	$\psi_\sigma$	$n$
0,4	-303	532	114,4	418	591	1,22	1	1,1	0,1	1,24

Результаты расчета вероятности разрушения и безотказной работы контактного кольца приведены в таблице 2.

Таблица 2

#### Результаты расчета вероятности безотказной работы контактного кольца

Натяг кольца $\Delta$ , мм	Экв. сила $F$ , Н	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_{MAX}$ , МПа	$\Delta\sigma$ , МПа	$\bar{\sigma}_{MAX}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{-1}$ , МПа	$S_{\Delta\sigma}$	$\nu_{\Delta\sigma}$	$P_{разр}$	$P_{без}$
0,4	5	591	418	62	418	591	48	0,229	$6,77 \cdot 10^{-6}$	0,99999

Полученные значения коэффициента запаса на усталостную прочность  $n=1,24$  и вероятности безотказной работы  $P_{без}=0,99999$  соответствует требованиям, предъявляемым к конструкции токосъемных устройств космических аппаратов типа ЭКСПРЕСС.

#### Заключение

В работе предложены методики аналитического расчета напряженно-деформированного состояния контактных колец при работе кольцевых токосъемных устройств космических аппаратов. Методики основаны на известных положениях теории усталости и теории надежности, которые позволяют

обеспечить требуемую усталостную прочность и надежность контактных колец, работающих в условиях пластичности, в течение заданного срока службы или числа циклов нагружения.

Методика может быть использована для обоснования принятия конструкторско-технологических решений при проектировании новых или проверки существующих кольцевых токосъемных устройств. Простая формулировка методик позволяет решать, как проверочные, так и проектировочные расчеты колец в зависимости от поставленной задачи и аналитически определять практически любой расчетный параметр.

#### Библиографические ссылки

1. Обеспечение прочности контактных колец токосъемных устройств космических аппаратов / А.А. Гришин, И.В. Кудрявцев // *Космонавтика и ракетостроение*. 2018. №3(102). С.81-91.
2. Косурина Т. А. Актуальные проблемы совершенствования систем электропитания космических аппаратов // *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 3 (68). С. 66-69.
3. Гришин А. А., Смирнов Н. А., Харитонов А. И. Анализ конструкции кольцевых токосъемных устройств // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 5 (57). С. 146-153.
4. Гришин А. А., Стругавец А. Г. Потери на токосъемных устройствах при передаче электрической энергии от солнечных батарей на космический аппарат // *Труды МАИ*. 2017. № 97. С.6.
5. Holmberg K. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part I: Modelling stresses and strains // *Surf. Coat. Tech.* 2006. V. 200. P. 3793-3809.

#### References

1. Grishin A. A., Kudryavcev I. V. [Ensuring the strength of contact rings of current-carrying devices of spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2018, No. 3, P. 81–91 (In Russ.).
2. Kosurina T. A. [Actual problems of improving the power supply systems of spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2012, No. 3 (68), P. 66–69 (In Russ.).
3. Grishin A. A., Smirnov N. A., Kharitonov A. I. [The analysis of the structure of ring current collection devices]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 4, P. 146–153 (In Russ.).
4. Grishin A. A., Strugovec A. G. [Evaluation of design decisions in the part of losses for current collection devices in the transmission of electrical energy from solar batteries] *Trudy MAI*. 2017, No. 97 (In Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/>. (accessed 25.12.2017).
5. Holmberg K. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part I: Modelling stresses and strains // *Surf. Coat. Tech.* 2006. V. 200. P. 3793-3809.

© Гришин А. А., 2023

УДК 67.02

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОДОВ  
С ЛИТЫМИ УГОЛКАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ  
ПО СЕРЕБРЯНОМУ ПОКРЫТИЮ**

Ф. Д. Евсеев

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: evseevfd@iss-reshetnev.ru

*Разработан способ изготовления волноводных трактов космического аппарата, позволяющий произвести сборку из разнородных материалов по серебряному покрытию с применением низкотемпературной пайки.*

*Ключевые слова: волновод, низкотемпературная пайка, литье деталей, гальвано-химические покрытия.*

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING WAVEGUIDES  
WITH MOLDED CORNERS USING LOW-TEMPERATURE SOLDERING  
ON SILVER COATING**

F. D. Evseev

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: evseevfd@iss-reshetnev.ru

*A method has been developed for the manufacture of waveguides, which makes it possible to assemble from dissimilar materials over a silver coating using low-temperature soldering.*

*Keywords: waveguide, low-temperature soldering, casting of parts, galvanic-chemical coatings.*

При изготовлении волноводов с применением литых уголков из литейного алюминиевого сплава марки ЛАСВИСС 2 на этапе гальванического нанесения серебра выявляются недопустимые дефекты, такие как растравы литой структуры уголка, как показано на рисунке 1, и участки со вздутием серебряного покрытия на трубах и на уголках, как показано на рисунке 2.

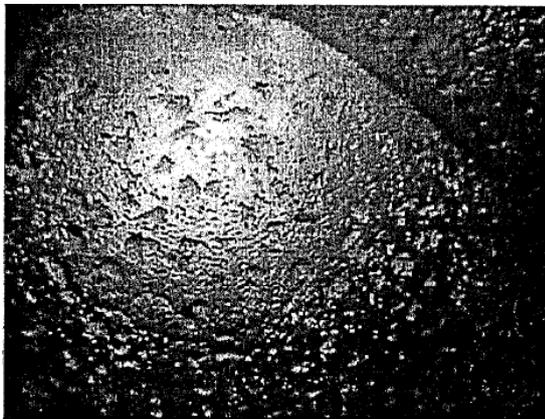


Рис. 1. Изображение растрыва литой структуры

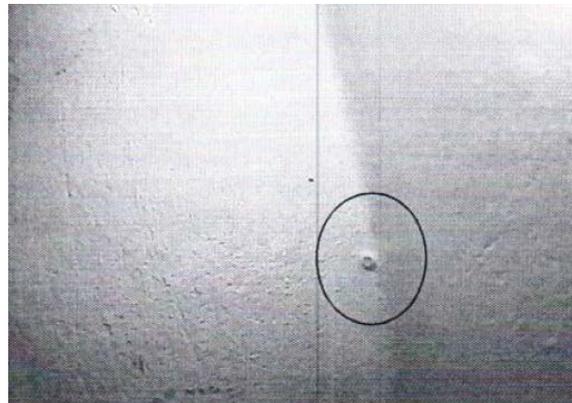


Рис. 2. Изображение вздутия серебряного покрытия внутри волноводного канала

Возможной причиной образования участков со вздутиями серебряного покрытия является применение в конструкции различных материалов волноводной сборки, которые имеют различную технологию подготовки поверхности под покрытие.

Причиной растратов литой структуры являются щелочные растворы и количество подготовок. Покрывая литой уголок отдельно от волноводной сборки исключаются такие операции, оказывающие агрессивное воздействие на литую структуру как, подготовка под пайку и отмывка флюса.

Основная идея заключается в покрытии интегрируемых частей волновода отдельно и последующей сборкой с применением низкотемпературной пайки по серебряному покрытию. Опробовано 4 схемы гальванического нанесения серебра на литой уголок [1]:

- 1 – Хим.Н9.Ср9-12 прп.бензотриазол;
- 2 – Н9.М9.Ср3 прп.бензотриазол;
- 3 – Хим.Н9.М6.Ср3-6 прп.бензотриазол;
- 4 – Хим.Н9.Хим.М3.Ср3-6 прп.бензотриазол.

Лучше всех показало себя покрытие Хим.Н9.Ср9-12 прп.бензотриазол. Исследованию подвергались литые уголки в количестве 5 штук с покрытием Хим.Н9.Ср9-12 прп.бензотриазол. При эндоскопическом и микроскопическом осмотре установлено, что только на одном образце из 5 присутствует единичное вздутие. На остальных трех схемах нанесения серебра на образцах наблюдались многочисленные вздутия. На интегрируемых частях волновода так же применяется схема гальванического нанесения серебра Хим.Н9.Ср9- 12 прп.бензотриазол.

Процесс низкотемпературной пайки частей волновода с литым уголком выполняются припоем с применением флюса при температуре 240-260. Пайке подвергалось 5 волноводов. По результатам эндоскопического осмотра внешнего вида поверхностей все волноводы соответствуют заявленным требованиям КД и НТД.

Данная технология низкотемпературной пайки волноводов с литыми уголками является альтернативой для технологии высокотемпературной пайки. Так как технология высокотемпературной пайки волновода с литым уголком обладает рядом сложностей:

- близость температуры плавления припоя (570-590 $^{\circ}$ C) с температурой плавления металла волноводной трубы и литого уголка (610-650 $^{\circ}$ C), и как следствие необходимость точного позиционирования паяемого изделия относительно индуктора, соблюдения временного интервала пайки, требование высокой квалификации паяльщика;

- невозможность одновременной пайки обоих стыков волноводных труб с литым уголком, что влечет за собой увеличение времени подготовки поверхности под пайку и увеличение длительности операции пайки.

Разработанная технология изготовления волноводов с литыми уголками с применением низкотемпературной пайки по серебряному покрытию дает возможность изготовления предлагаемым способом волноводных трактов из алюминиевых сплавов, обладающих высокой точностью и прочностью, не имеющих деформаций, входящих в него деталей, обеспечивающих необходимые углы гибов.

#### Библиографическая ссылка

1. ОСТ92-1436. Покрытия металлические и неметаллические неорганические.

#### Reference

1. OST92-1436. Metallic and non-metallic inorganic coatings.

© Евсеев Ф. Д., 2023

УДК 67.02

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ФЛАНЦЕВ  
С УЛУЧШЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ  
АНАЭРОБНОГО АДГЕЗИОННОГО СОСТАВА**

Ф. Д. Евсеев\*, Л. С. Удод

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: evseevfd@iss-reshetnev.ru

*Разработан способ получения литых деталей для космического аппарата с поверхностью, которая обеспечивает заданные характеристики за счет использования анаэробного адгезионного состава.*

*Ключевые слова: анаэробные адгезионные материалы, литьё деталей, устройства СВЧ.*

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MANUFACTURING CAST WAVEGUIDE FLANGES  
WITH SURFACE IMPROVEMENT USING ANAEROBIC ADHESION COMPOSITION**

F. D. Evseev\*, L. S. Udod

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: evseevfd@iss-reshetnev.ru

*A method has been developed for producing cast parts with a surface that provides the desired characteristics through the use of an anaerobic adhesive composition.*

*Keywords: на английском языке: anaerobic adhesive materials, casting parts, microwave devices.*

В настоящее время одним из актуальных направлений космической отрасли является создание систем связи. Наиболее сложными элементами космических аппаратов (КА) с точки зрения изготовления являются элементы радиоэлектроники – антенны и устройства СВЧ. Уровень развития области радиоэлектроники определяется уровнем развития телекоммуникационных систем, радиолокации, навигации, телеметрии. Волноводы, входящие в антенно-фидерные устройства, служат направляющими системами для передачи энергии от передатчика в передающую антенну, и от приемной антенны к радиоприемнику в радиолокационных космических и других станциях и представляют собой каналы с частотно-зависимыми характеристиками. Основным преимуществом металлических волноводов по сравнению с двухпроводной симметричной и коаксиальной линиями являются малые потери на СВЧ. Это обусловлено практическим отсутствием излучения энергии в окружающую среду и малыми тепловыми потерями энергии [1].

Исходя из поставленных задач, к волноводам предъявляются такие требования как: низкая масса; минимальные потери при передаче сигнала, снижение стоимости изготовления, теплостойкость без искажения геометрии рабочей поверхности. Так же одним из основных требований к изготовлению волноводов в условиях серийного производства является сокращение производственного процесса. Сложные волноводные тракты образуются путем стыковки отдельных волноводных элементов, которые стыкуются с помощью волноводных фланцев. Фланцевое соединение должно обеспечивать электрический контакт и не допускать изменения характеристического сопротивления в местах соединений. При несоблюдении этих требований возможны потери в контактах, частичное отражение энергии от области разъема и излучение ее в окружающее пространство [2].

При передаче волн высокой частоты шероховатость внутренних и фланцевых поверхностей волноводов оказывает существенное влияние на передаваемый сигнал. Поэтому основное требование для данных поверхностей – это обеспечение низкой степени шероховатости, которая не должна искажать значение длины волны. Одним из перспективных процессов изготовления фланцев волноводов является литье. Среди многообразия современных способов литья, литье по выплавляемым моделям занимает особое положение в связи с главной его особенностью – возможностью изготовления из разнообразных сплавов отливок сложной конфигурации.

Для начала изготавливают восковую модель посредством инжектирования модельного воска в резиновую пресс-форму. Затем восковые модели спаивают в модельные блоки с литниковой системой. Модельный блок устанавливают в опоку – приспособление для удержания формовочной смеси, и заливают гипсовой формомассой. После затвердевания опоку помещают в прокаточную печь для удаления воска и придания необходимых свойств гипсовой форме. Заливку форм производят сразу же после прокатки в нагретом состоянии. Заливка алюминиевого сплава проходит в вакууме. После затвердевания залитого металла и охлаждения отливок форма разрушается, отливки отделяют от литников и подвергают термической обработке. По сравнению с методом изготовления при помощи механической обработки, метод литья является более технологичным, менее энергозатратным и более экономичным с обеспечением более высокой стабильности характеристик волноводов. К недостаткам этого способа можно отнести наличие в них пористости, как показано на рисунке 1, 2.

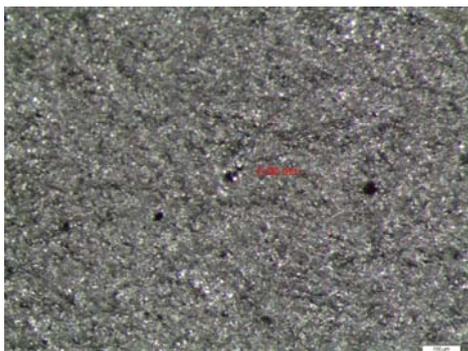


Рис. 1. Снимок поверхности отливки при увеличении  $\times 80$  до нанесения анаэробного адгезионного состава

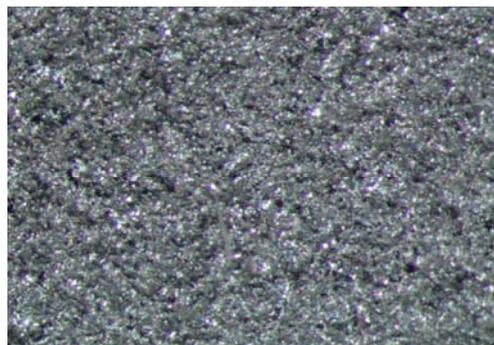


Рис. 2. Снимок поверхности отливки при увеличении  $\times 80$  после нанесения анаэробного адгезионного состава

Одним из самых распространенных типов литейного брака являются раковины, вскрывающиеся в процессе механической обработки отливок. Усадочные раковины (рыхлость и пористость) имеют вид углублений и пустот образующиеся в результате уменьшения объема материала при затвердевании и дальнейшем охлаждении. Размер усадочных раковин зависит от степени усадки и от температуры заливки металла в форму, а также от конструкции и размеров отливки и от скорости заполнения формы.

Для обеспечения низкой степени шероховатости и герметизации микропор поверхности, после доведения геометрии волноводных фланцев механической обработкой, поверхность подвергают пропитке анаэробным адгезионным составом, с высокой проникающей способностью до 0, 1 мм, при этом герметичность и защита от внутренней коррозии изделий сохраняется в широком диапазоне температур от  $-60$  до  $+(100\div 150)$   $^{\circ}\text{C}$ . Пропитка производится в водной среде при температуре  $90\text{-}100$   $^{\circ}\text{C}$ , после чего неотвержденные излишки адгезива удаляются с поверхности фланца промывкой в воде. Чистота поверхностей фланцев, изготовленных данным методом, удовлетворяет требованиям для нанесения лакокрасочных и гальвано-химических покрытий без дополнительной подготовки поверхности [3]. Применение данного метода изготовления волноводных фланцев позволяет обеспечить требуемый контакт, обеспечивающий заданные характеристики, сократить цикл изготовления и снизить трудоемкость.

#### Библиографические ссылки

1. Петров Б. Н. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 2000. 357 с.
2. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства : учеб. пособие для вузов. М. : Высшая школа, 1974. 304 с.
3. Москвичев А. Н. // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 1. С. 12.

#### References

1. Petrov B. N. Electrodynamics and propagation of radio waves. M.: Radio and communication, 2000. 357 p.
2. Bushminsky I. P. Manufacturing of microwave structural elements. Waveguides and waveguide devices: textbook. allowance for universities. M. : Higher school, 1974. 304 p.
3. Moskvichev A. N. // Adhesives. Sealants. Technologies. 2005. No. 1. P. 12.

УДК 621.7.067

## **ФОРМАЛИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СИСТЕМЫ ТЕЛ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ СБОРКИ АППАРАТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Е. Ю. Зырянов, П. Н. Смирнов, Н. А. Смирнов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: smirnov@sibsau.ru

*Описана конструкция весоизмерительной платформы в технологическом процессе сборки аппаратов специального назначения. Приведен алгоритм контроля качества сборки путем оценки координат центра тяжести платформы.*

*Ключевые слова: центр тяжести, технологический процесс сборки, тензометрические датчики.*

## **FORMALIZATION OF THE INERTIA CENTER POSITION CONTROL OF A BODIES SYSTEM IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SPECIAL PURPOSE DEVICES ASSEMBLY**

E. Y. Zyrjanov, P. N. Smirnov, N. A. Smirnov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: smirnov@sibsau.ru

*The design of a weighing platform based on load cells, used in the technological process of assembling special-purpose devices is described. An algorithm for monitoring assembly quality by estimating the coordinates of the platform's center of inertia is presented.*

*Keywords: center of gravity, assembly process, center of inertia, load cells.*

Автоматизация процессов сборки систем сложной структуры и конфигурации, присутствующих в аппаратах специального назначения требует постоянного контроля положения центра тяжести. Аналогичные задачи возникают при поиске технических и технологических решений в различных областях техники [1-3]. В статически определимых задачах центр тяжести определяется аналитическим способом нахождением равнодействующей силы и точки ее приложения в системе параллельных сил [4]. На практике центр тяжести сложных конструкций определяется методом взвешивания на четырехопорных весах или аналогичных весоизмерительных конструкциях [5]. В данной работе также используется весоизмерительная платформа, в опорах которой применены балочные тензометрические датчики.

В процессе сборки аппарата необходимо установить в заранее известные места отдельные элементы различной формы и массы. Автоматизировать процесс сборки возможно контролем координат центра тяжести платформы на этапах ее загрузки сборочными единицами на участке комплектации и разгрузки на участке сборки.

Экспериментальный весоизмерительный стенд (рис. 1) смонтирован на неподвижном основании 1. На основании через проставки установлены четыре балочных тензометрических датчика 3 с регулируемыми по высоте опорами 4, на которые опирается весоизмерительная платформа 5. На платформу в определенной последовательности устанавливаются грузы с известными массами  $m_1, m_2 \dots m_n$ . На рабочих поверхностях балочных тензометрических датчиков наклеены четыре тензорезистора 6, соединенных по мостовой схеме. Постановка груза на весоизмерительную платформу вызывает деформацию тензодатчиков и изменение сопротивления тензорезисторов, сигнал с которых поступает через АЦП на микроконтроллер и выводится на экран компьютера.

При сборке измерительного стенда необходимо установить высоту опор 4 таким образом, чтобы весоизмерительная платформа имела контакт со всеми опорами. Контроль положения платформы на тензодатчиках выполняется без грузов. Необходимо добиться наиболее равномерных величин реакций всех опор. Выполнена серия экспериментов по загрузке и разгрузке весоизмерительной платформы. Сравнение координат центра тяжести платформы, вычисленных по показаниям тензодатчиков и аналитическим методом показали расхождение значений не более 5%.

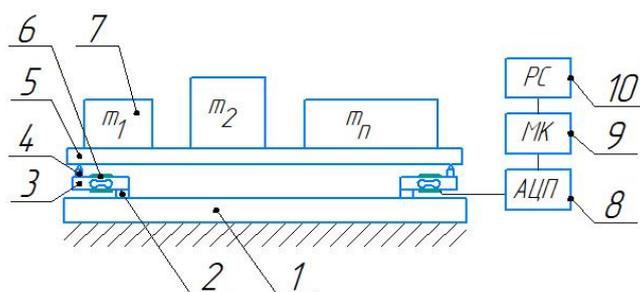


Рис. 1. Схема измерительного стенда:

1 – основание; 2 – проставка крепления; 3 – балочный тензометрический датчик; 4 – опора; 5 – весоизмерительная платформа; 6 – тензорезисторы; 7 – грузы; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – микроконтроллер; 10 – персональный компьютер

Выполненные исследования показали работоспособность алгоритма контроля качества сборочного процесса путем оценки положения центра тяжести сборочного объекта. Метод измерения сил в опорах платформы с использованием балочных тензорезисторов, аналогово-цифрового преобразователя НХ711 и микроконтроллера Arduino также показали удовлетворительную работоспособность и достаточную точность измерений.

### Библиографические ссылки

1. Царик Р. С. Оценка влияния аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки палубного контейнерного штабеля / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 2. С. 207–221.
2. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В. Аналитическое определение продольной координаты центра тяжести навесного МТА // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 26–27 ноября 2018 года. Том Часть I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. С. 12-15.
3. Определение центра тяжести беспилотного летательного аппарата конвертопланового типа / Р. Н. о. Набиев, А. А. о. Абдуллаев, Г. И. о. Гараев, В. А. о. Аббасов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 5(229). С. 258-268.
4. Бутенин Н. В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В двух томах. СПб.: Издательство «Лань», 1998. 736 с.
5. Kotaro Mori, Daisuke Kono, Atsushi Matsubara. A robust level error estimation method for machine tool installation // Precision Engineering 58 (2019) 70–76.

### References

1. Tsarik R. S. Otsenka primeneniya tsentra tyazhelogo konteynera na nagruzku palubnogo konteyner-nogo shtabelya / R. S. Tsarik // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 2021. T. 13. № 2. P. 207–221.
2. Belyayev A.N., Orobinskiy V.I., Trishina T.V. Analiticheskoye opredeleniye dlinnoy koordinaty tsen-tra tyazhesti navesnogo MTA // Nauka i obrazovaniye na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya : materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Voronezh, 26–27 noy-abrya 2018 goda. Tom Chast' I. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperator Petra I, 2018. P. 12-15.
3. Opredeleniye tsentra tyazhesti bespilotnogo letatel'nogo apparata konvertoplanovogo tipa / R. N. o. Nabiyev A.A. o. Abdullayev, G. I. o. Garayev, V. A. o. Abbasov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskoye nauki. 2022. № 5(229). P. 258-268.
4. Butenin N. V., Lunts YA.L., Merkin D.R. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. V dvukh tomakh. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 1998. 736 s.
5. Kotaro Mori, Daisuke Kono, Atsushi Matsubara. A robust level error estimation method for machine tool installation // Precision Engineering 58 (2019) 70–76.

УДК 621.923.9

**АНАЛИЗ ТОПОГРАФИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОГНУТОЙ ЗАГОТОВКИ ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ДО И ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ**

П. А. Иванов, В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: Ivanov.pasch.iva@yandex.ru

*Проведен детальный анализ полученных значений шероховатости и 3D профиля внутренней поверхности, до и после обработки абразивным потоком прямоугольной заготовки, полученной методом селективного лазерного сплавления. Установлено существенное уменьшение шероховатости и изменение профиля поверхности исследуемого образца после 10 начальных циклов.*

*Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, изогнутая заготовка прямоугольного сечения, обработка абразивным потоком, шероховатость, топография.*

**ANALYSIS OF THE TOPOGRAPHY OF THE INNER SURFACE OF A CURVED BILLET OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING BEFORE AND AFTER ABRASIVE FLOW MACHINING**

P. A. Ivanov, V. A. Levko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: Ivanov.pasch.iva@yandex.ru

*A detailed analysis of the obtained values of the roughness and 3D profile of the inner surface, before and after the abrasive flow machining of a rectangular workpiece obtained by selective laser melting, was carried out. A significant decrease in roughness and a change in the surface profile of the test sample after 10 initial cycles were found.*

*Keywords: selective laser melting, curved rectangular billet, abrasive flow machining, roughness, topography.*

**Введение.** Перспективным решением производственных задач по изготовлению деталей сложной геометрии, а также уменьшением их массы является, применение передовой технологии аддитивного производства, метода селективного лазерного сплавления (*selective laser melting (SLM)*). Технология *SLM*, позволяет исключить традиционные способы формообразования сложной поверхности, получить практически любую геометрию детали с высокой точностью в существенно кратчайшие сроки [1].

Однако, несмотря на высокую точность получаемых размеров и свободу геометрической формы, поверхность таких заготовок имеет грубую шероховатость, пористость и остаточные напряжения. Это связано, с так называемым эффектом лестницы (*step effect*) при получении криволинейных поверхностей заготовок методом *SLM*, что в свою очередь требует применения эффективной финишной обработки.

Так с использованием отечественных установок, специального приспособления [2] и состава рабочей среды, была отработана возможность применения технологии обработки абразивным потоком для уменьшения шероховатости внутренних криволинейных поверхностей изогнутой заготовки-образца прямоугольного сечения полученной методом *SLM* [3].

За 20 циклов обработки шероховатость поверхности уменьшилась  $Ra$  с  $8 \div 10$  мкм до  $0,2 \div 1,3$  мкм. При этом удалось добиться равномерной обработки, как по длине канала, так и в углах по поперечному сечению, направление шероховатости было параллельно направлению потока рабочей среды.

**Топография поверхности до и после обработки.** В продолжение данного исследования нами проведен более детальный анализ шероховатости внутренней поверхности некоторого участка экспериментального образца до и после обработки абразивным потоком. Для этого с помощью оптической измерительной системы модели *TRScan*, предназначенной для измерений параметров шероховатости и микроконтура поверхностей. Получены 3D модель поверхности с значениями шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  до (рис. 1) и после 10 начальных циклов обработки (рис. 2).

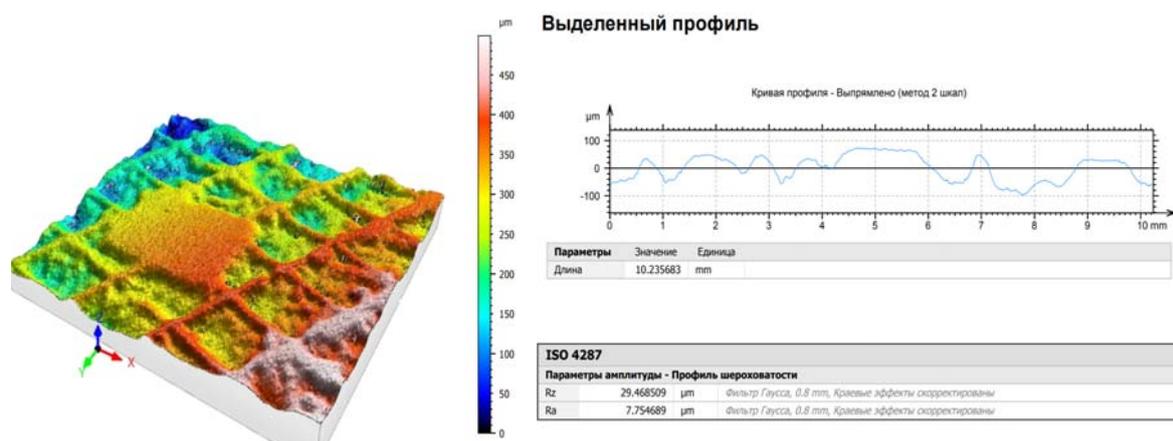


Рис. 1. Топография необработанной поверхности



Рис. 2. Топография обработанной поверхности

Сравнение двух топографий поверхности наглядно показывает, что после первых начальных циклов обработки абразивным потоком существенно улучшились такие показатели шероховатости как  $Ra$ ,  $Rz$ , это заметно и по 3D картине профиля, происходит сглаживание кратеров, пиков поверхности. На кривой профиля наблюдается характерные пики шероховатости до обработки, как после профиль становится более равномерный.

**Выводы.** Результаты детального анализа шероховатости внутренней поверхности изогнутой заготовки полученной способом SLM, до и после обработки абразивным потоком показал, что данный способ обеспечил не только изменение направления и величины шероховатости поверхности

от  $Ra = 7,8$  мкм до  $Ra = 2,8$  мкм, но и характерно видно сглаживание пиков по 3D модели профиля, что подтверждает физику процесса обработки абразивным потоком, где при течении рабочая среда полностью копирует профиль заготовки и возникают не только нормальные, но и касательные напряжения.

С учетом рекомендаций по выбору вида и величины зерна наполнителя [4] обработку абразивным потоком можно применять для финишной обработки внутренних поверхностей изогнутых прямоугольных заготовок полученных методом *SLM* в условиях мелкосерийного производства.

### Библиографические ссылки

1. А.С. Вехов, С.А. Титаренко. Применение аддитивных технологий в современном производстве. Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 90-92.

2. Патент на полезную модель № 217294 U1 Российская Федерация, МПК В24В 31/116. Приспособление для обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутого в нескольких плоскостях волновода : № 2022131087 : заявл. 29.11.2022 : опубл. 27.03.2023 / П. А. Иванов, В. А. Левко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева". EDN AYGDTV.

3. Обработка абразивным потоком внутренних поверхностей криволинейных волноводов прямоугольного сечения, полученных аддитивным способом / П. А. Иванов, В. А. Левко, М. М. Михнев, Е. В. Патраев // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 7. С. 600-605. DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-7-600-605. EDN SRDKMG.

4. Иванов, П. А. Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 6-13. DOI 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13. EDN GONIUI.

### References

1. A.S. Vekhov, S.A. Titarenko. Application of additive technologies in modern production. Reshetnev readings. 2018. Vol. 1. pp. 90-92.

2. Utility model Patent No. 217294 U1 Russian Federation, IPC B24B 31/116. Device for abrasive flow treatment of the inner surface of a waveguide curved in several planes: No. 2022131087 : application 29.11.2022 : publ. 27.03.2023 / P. A. Ivanov, V. A. Levko ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev".

3. Ivanov P.A., Levko V.A., Mikhnev M.M., Patraev E.V. Abrasive flow treatment of internal surfaces of curved rectangular waveguides obtained by additive method. Bulletin of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 102. No. 7. pp. 600-605.

4. Ivanov, P. A. The choice of the type and size of the filler grain when processing rectangular blanks from non-ferrous alloys with an abrasive flow / P. A. Ivanov, V. A. Levko // Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2022. Vol. 25, No. 2. pp. 6-13.

© Иванов П. А., Левко В. А., 2023

УДК 614.844.6

## ПОДДЕРЖАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Н. С. Искров<sup>1\*</sup>, А. А. Артемьев<sup>2</sup>, А. С. Гайдук<sup>3</sup>, Н. А. Сидун<sup>4</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>1</sup>\*E-mail: iskrovns@mail.ru

<sup>2</sup>E-mail: artur.art15@yandex.ru

<sup>3</sup>E-mail: alinagaiduk@bk.ru

<sup>4</sup>E-mail: nsidun@list.ru

*Статья проводит анализ метода поддержания температуры литий-ионных аккумуляторных батарей, для предотвращения их возгорания, которые активно используются в современных космических аппаратах, которые эксплуатируются на низкой околоземной орбите.*

*Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторные батареи, космический аппарат, уголекислота.*

## MAINTAINING THE TEMPERATURE OF LITHIUM-ION BATTERY PACKS

N. S. Iskrov\*, A. A. Artemiev, A. C. Gaiduk, N. A. Sidun

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>1</sup>\*E-mail: iskrovns@mail.ru

<sup>2</sup>E-mail: artur.art15@yandex.ru

<sup>3</sup>E-mail: alinagaiduk@bk.ru

<sup>4</sup>E-mail: nsidun@list.ru

*The article analyzes a method of maintaining the temperature of lithium-ion rechargeable batteries to prevent their ignition, which are actively used in modern spacecraft that operate in low-Earth orbit.*

*Keywords: lithium-ion batteries, space vehicle, carbonic acid.*

В настоящее время развитие космонавтики является одной из важнейших тем развития человечества. Каждый год происходит увеличение количества запусков космических аппаратов. Особое внимание уделяется созданию и развитию крупных космических аппаратов, которые предназначены для полетов в космическое пространство. Одним из ключевых элементов для их функционирования является ракетное топливо, которое обеспечивает им большую тягу и позволяет достигать необходимых скоростей и орбит.

Одновременно с этим, также разрабатываются и эксплуатируются небольшие космические аппараты, которые предназначены для работы на низкой околоземной орбите. Они могут быть снабжены аккумуляторными батареями, которые служат источником энергии для их работы. Это позволяет им преодолевать гравитационное притяжение и поддерживать стабильную орбиту вокруг Земли.

Такие небольшие космические аппараты могут выполнять широкий спектр задач, включая научные исследования Земли и космоса, обнаружение и наблюдение астрономических объектов, обеспечение связи и передачи данных, а также обеспечение навигации и сбора информации о погоде и климате [1].

Аккумуляторные батареи являются аккумуляторами, которые используются в мобильных телефонах, электроавтомобилях, электросамокатах и другой подобной технике. Эти аккумуляторы относятся к типу литий-ионных аккумуляторных батарей, которые являются обычной практикой в настоящее время.

Однако использование данных аккумуляторов также имеет свои проблемы. Один из основных рисков – возможность возгорания. Проблема возгорания может возникнуть в результате серьезного повышения температуры или повреждения корпуса аккумулятора. Если корпус аккумулятора повреждается, предотвратить возгорание очень сложно, так как литий-ионные аккумуляторы быстро реагируют с кислородом. Однако, если аккумулятор нагревается, человек может контролировать его температуру. Когда температура достигает примерно 130-150°C, полимерный сепаратор начинает плавиться и возникает искра короткого замыкания. В результате нагрева жидкий электролит может разлагаться и переходить в газообразную форму [2]. Кроме того, в литий-ионных аккумуляторах содержатся оксиды металлов, которые при нагревании выделяют кислород. Кислород, в свою очередь, способствует горению. В итоге содержащиеся в аккумуляторе жидкости и газы могут загореться, что приводит к еще большему выделению тепла и газов.

Для предотвращения возгорания и обеспечения большего времени для принятия мер по безопасности, можно использовать специальные форсунки, внедренные в аккумуляторы, которые подают углекислотное огнетушащее вещество. Углекислота – это диоксид углерода в жидком состоянии. Работа огнетушащего вещества основана на резком расширении объема газа при его высвобождении из баллона, что приводит к значительному охлаждению. При работе данной системы температура может снижаться до -70 °С, что помогает предотвратить возникновение возгорания [3].

Когда углекислый газ подается в жидкой фазе и под высоким давлением, он обеспечивает эффективную подачу огнетушащего вещества во время тушения пожара. При выходе из растрескивания и снижении давления, газ расширяется и переходит в плотную газовую фазу. Этот процесс позволяет заполнить все свободные объемы внутри энергоисточника огнетушащим веществом, что предотвращает доступ кислорода к горящим материалам.

Уменьшение концентрации кислорода внутри энергоисточника является важным фактором для предотвращения распространения горения. Кислород играет роль окислителя, который поддерживает горение. Поэтому, снижение его концентрации существенно снижает риск возгорания и способствует тушению пламени.

Кроме того, углекислый газ способствует охлаждению всех компонентов, находящихся внутри блока или аккумуляторных батарей. Охлаждение является важной составляющей для оптимальной работы и долговечности аккумуляторов. Высокая температура может способствовать ускоренному старению батарей, снижению их емкости и повреждению внутренних компонентов. Охлаждение улучшает эффективность работы батарей и продлевает их срок службы.

Замедление химических реакций в батареях, вызванное охлаждением, также может привести к снижению риска возгорания или короткого замыкания. Это позволяет обеспечить более безопасное использование и хранение аккумуляторов.

Таким образом, использование углекислого газа для тушения пожаров или охлаждения энергоисточников имеет несколько положительных эффектов. Он позволяет заполнить пространство огнетушащим веществом, снижает концентрацию кислорода, способствующую горению, и обеспечивает охлаждение компонентов, что повышает эффективность работы и продлевает срок службы энергоисточников.

### Библиографические ссылки

1. Расчёт аккумуляторных батарей космических аппаратов спутниковой системы связи на низкой круговой орбите / Дыбля Ю. В., Крылова О. С., Яковлев К. В. // Инновационная наука. 2020. вып. 4. С. 31-34.
2. Королев, А. А. Электрокары и проблема тушения литий-ионных батарей / А. А. Королев, Н. В. Лоскутов, А. Н. Сергиенко // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 года / Сост.: А.В. Зыков, Н.В. Федорова, О.Е. Евсеева. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2021. С. 255-259.
3. Чеберяк, В. В. Мобильные средства пожаротушения литий-ионных аккумуляторов на электромотоциклах / В. В. Чеберяк // Трибология и проблемы МЧС России : Сборник материалов международ-

ной научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны, Иваново, 20–21 октября 2022 года. Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2022. С. 116-121.

### References

1. *Raschyot akkumulyatornyh batarej kosmicheskikh apparatov sputnikovoj sistemy svyazi na nizkoj krugovoj orbite* [Calculation of accumulator batteries of spacecrafts of the satellite communication system in low circular orbit] / Dyblya Yu. V., Krylova O. S., Yakovlev K. S., Yakovlev K. V. // *Innovacionnaya nauka* [Innovative Science]. 2020. issue. 4. p. 31-34.

2. Korolev, A. A. *Elektrokary i problema tusheniya litij-ionnyh batarej* [Electric cars and the problem of extinguishing lithium-ion batteries] / A. A. Korolev, N. V. Loskutov, A. N. Sergienko // *Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya : Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg* [Fire safety: modern challenges. Problems and solutions : Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, St. Petersburg], April 22, 2021 / Compiled by: A.V. Zykov, N.V. Fedorova, O.E. Evseeva. St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2021. p. 255-259.

3. Cheberyak, V. V. *Mobil'nye sredstva pozharotusheniya litij-ionnyh akkumulyatorov na elektromobilyah* [Mobile means of fire extinguishing lithium-ion batteries on electric vehicles] / V. V. Cheberyak // *Tribologiya i problemy MCHS Rossii : Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu obrazovaniya grazhdanskoj oborony* [Tribology and problems of EMERCOM of Russia : Collection of materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 90th anniversary of the formation of civil defense], Ivanovo, October 20-21, 2022. Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Fire-fighting Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters", 2022. p. 116-121.

© Искров Н. С., Артемьев А. А., Гайдук А. С., Сидун Н. А., 2023

УДК 539.4.014.13

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАГОТОВКАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С. К. Каргапольцев<sup>1</sup>, Р. С. Большаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Российская Федерация, 660074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 660074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15  
E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*Предлагается способ неразрушающего определения поверхностных остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов, что на данный момент является актуальной задачей.*

*Ключевые слова: поверхностные остаточные напряжения, методы неразрушающего контроля, алюминиевые сплавы.*

## EXPRESS METHOD FOR DETERMINING RESIDUAL STRESS IN ALUMINUM ALLOY BILLETS

S. K. Kargapoltsev<sup>1</sup>, R. S. Bolshakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Technical University  
83, Lermontov str., Irkutsk, 660074, Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University  
15, Chernishevskiy str., Irkutsk, 660074, Russian Federation  
E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*A method is proposed for the non-destructive determination of surface residual stresses in workpieces made of aluminum alloys, which is currently an urgent task.*

*Keywords: surface residual stresses, non-destructive testing methods, aluminum alloys.*

**Введение.** Создание алюминиевых плит предполагает соответствующую их обработку для придания необходимых свойств [1 – 3]. На первоначальном этапе придания изделиям нужных прочностных характеристик при помощи охлаждения после нагрева, которое производится в основном неравномерно, на поверхности алюминиевой плиты возникают остаточные напряжения. Наличие остаточных напряжений оценивается различными методами [4, 5], однако подходы, связанные с неразрушающим контролем изделий, недостаточно развиты.

В предлагаемом докладе оценивается возможность использования неразрушающих методов контроля растягивающих и сжимающих поверхностных остаточных напряжений, находящихся в равновесии между собой.

**I. Общие положения. Постановка задачи.** Как теоретические, так и экспериментальные исследования остаточных напряжений, возникающих при закалке, показывают, что характер их распределения с высокой точностью можно аппроксимировать параболической зависимостью [1]. На рис. 1 приведена принципиальная схема распределения поверхностных остаточных напряжений в исследуемом образце, показаны области с отрицательными остаточными напряжениями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , представляющими собой сжатие, области с положительным остаточным напряжением  $\sigma_3$  (растяжение), ось симметрии, а также толщина образца, обозначенная через  $H$ . Области напряжений проиллюстрированы заштрихованными участками.

Так как поверхность образца согласно технологии производства должна быть ровной, можно предположить, что положительное  $\sigma_3$  и отрицательные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  уравновешиваются между собой. Уравнение равенства в этом случае можно записать в виде

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3. \quad (1)$$

Соотнесение эпюры остаточных напряжений с заявленной принципиальной схемой требует определения мест расположения точек её начала на поверхности алюминиевой плиты, что подразумевает использование методов определения остаточных напряжений. К ним могут быть отнесены наиболее распространённые механические методы, подразумевающие разрушение исследуемого образца, рентгенографический метод и метод АФЧХ-тестирования, относящиеся к разрушающему контролю.

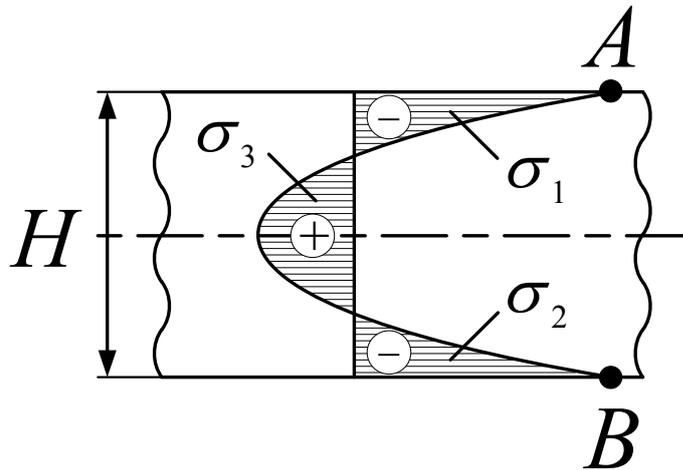


Рис. 1. Принципиальная схема распределения остаточных напряжений

## II. Оценка расположения остаточных напряжения в алюминиевой плите

На рис. 2 проиллюстрирована детализированная расчетная схема, предназначенная для построения соотношений между площадями растягивающих и сжимающих напряжений.

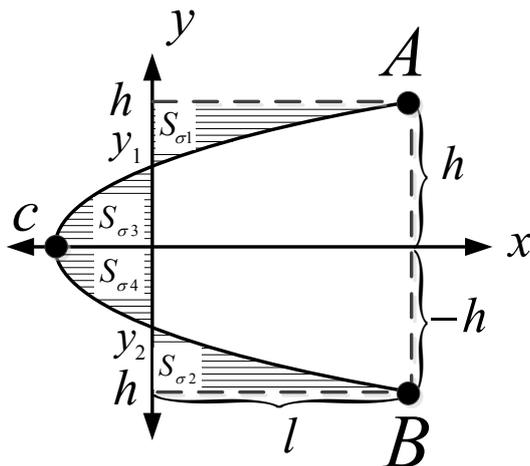


Рис. 2. Детализированная схема определения площадей

На данной схеме представлены следующие обозначения:  $l$  – расстояние от полученных экспериментальным путем точек начала эпюры остаточных напряжений до пересечения кривой параболы с осью  $Oy$ , разграничивающей площади растягивающей и сжимающей составляющих,  $h$  – расстояние от точек  $A$  и  $B$  до оси  $Ox$ ,  $c$  – вершина параболы,  $S_{\sigma_1}$ ,  $S_{\sigma_2}$ ,  $S_{\sigma_3}$ ,  $S_{\sigma_4}$  – площади распределения отрицательных и положительных напряжений. Площадь распределения положительных напряжений делит-

ся на две части для удобства формирования выражения для определения площади. Выражение равенства площадей в этом случае трансформируется следующим образом

$$S_{\sigma 1} + S_{\sigma 2} = S_{\sigma 3} + S_{\sigma 4}. \quad (2)$$

Для дальнейших выкладок необходимо использовать классическое уравнение параболы, так как площади остаточных напряжений соотносятся друг с другом через пропорции, ограниченные кривой параболы.

#### **Заключение.**

Таким образом, совместное использование подходов по неразрушающему контролю и известных теоретических положений позволяет без повреждений исследуемого образца определять не только наличие остаточных напряжений на его поверхности, но и устанавливать общую картину их расположения по всей заготовке.

#### **Библиографические ссылки**

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: МАШГИЗ, 1963. 233 с.
2. Промптов, А. И. Формирование общих подходов к управлению качеством поверхности при механической обработке / А. И. Промптов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 2(22). С. 98-101. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография / Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. 569 с.
3. Каргапольцев, С. К. Повышение прочности фрезерования сложнопрофильных деталей путем рационального проектирования схем их базирования / С. К. Каргапольцев, О. М. Кустов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2004. № 3. С. 39-44.
4. Каргапольцев, С. К. Остаточные деформации при фрезеровании мало жестких деталей с подкреплением / С. К. Каргапольцев ; Научный редактор А.И. Промптов. Иркутск: Иркутский Дом печати, 1999. 136 с.
5. Шастин, В. И. Лазерная модификация поверхностей трибологических сопряжений / В. И. Шастин, С. К. Каргапольцев // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 50-53.

#### **References**

1. Birger I.A. Residual stresses. M.: MASHGIZ, 1963. 233 p.
2. Promptov, A. I. Formation of general approaches to surface quality management during machining / A. I. Promptov // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2005. No. 2(22). P. 98-101. Kopylov Yu.R. Dynamics of processes of vibration-impact hardening: monograph / Voronezh: IPC "Scientific Book", 2011. 569 p.
3. Kargapoltsev, S.K. Increasing the strength of milling of complex-profile parts by rational design of their basing schemes / S.K. Kargapoltsev, O.M. Kustov // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2004. No. 3. P. 39-44.
4. Kargapoltsev, S.K. Residual deformations during milling of low-rigid parts with reinforcement / S.K. Kargapoltsev; Scientific editor A.I. Promptov. Irkutsk: Irkutsk House of Printing, 1999. 136 p.
5. Shastin, V.I. Laser modification of surfaces of tribological interfaces / V.I. Shastin, S.K. Kargapoltsev // Bulletin of mechanical engineering. 2017. No. 6. P. 50-53.6. Eliseev S. V., Kargapoltsev S. K., Bolshakov R. S., Eliseev A. V. Osobennosti dinamiki vibracionnyh tehnologicheskikh mashin: sistemnyj analiz, strukturnoe modelirovanie, rychazhnye svjazi [Features of the dynamics of vibration technological machines: system analysis, structural modeling, lever connections] // Systems. Methods. Technology. 2020. No. 4 (48). S. 12-19. DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-12-19.

© Каргапольцев С. К., Большаков Р. С., 2023

УДК 621.791.927.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА КАРБИДОСТАЛИ ПОЛУЧЕННОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ

С. А. Климов, Ф. М. Носков

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
E-mail: stepaklimov@yandex.com

*Индукционная наплавка основана на расплавлении присадочного материала и верхнего слоя металла вихревыми токами, наводимыми на поверхность изделия с помощью высокочастотного поля. Наплавка карбидостали позволяет получить износостойкие покрытия применяемые в ракетно-космической отрасли. Смешивание порошков быстрорежущей стали и твердых сплава позволяет получить композиционный материал с уникальными свойствами.*

*Ключевые слова: наплавка, композиционные материалы, сталь, микроструктура, индукционная наплавка, карбидосталь.*

## INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF CARBIDE STEEL OBTAINED BY INDUCTION SURFACING

S. A. Klimov, F. M. Noskov

Siberian Federal University  
79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: stepaklimov@yandex.com

*Induction surfacing is based on the melting of the filler material and the upper layer of metal by eddy currents induced on the surface of the product using a high-frequency field. Surfacing of carbide steel allows to obtain wear-resistant coatings used in the rocket and space industry. Mixing powders of high-speed steel and hard alloys makes it possible to obtain a composite material with unique properties.*

*Keywords: surfacing, composite materials, steel, microstructure, induction surfacing, carbide steel.*

Карбидосталь – это композиционный инструментальный материал, использующийся для металлообработки. Она обладает твёрдостью, теплостойкостью, износостойкостью, выше чем у быстрорежущей стали, а значит лучше подходит для резания металла. Слой карбидостали получают добавлением порошка твёрдого сплава, состоящего из карбидов в быстрорежущую сталь, с последующим расплавлением этих порошков на поверхности какой-либо детали.

Карбидостали отличаются термостойкостью, сочетанием характеристик твёрдых сплавов (твёрдости, износостойкости) и легированных сталей (прочность, вязкость). По своим параметрам занимают промежуточное положение между быстрорежущими сталями и твёрдыми сплавами. [1].

Карбидосталь имеет широкое применение в различных отраслях промышленности. Его прочность, жесткость и износостойкость делают его необходимым материалом для производства высококачественных инструментов и деталей для различных промышленных процессов.

Перспективы развития карбидосталей связаны с усовершенствованием технологий и методов производства. Новые разработки могут привести к улучшению свойств материала, таких как устойчивость к высоким температурам, упрочнение и повышение его жизненного цикла.

Карбидостали получают обычными методами порошковой металлургии прессованием смеси порошков исходных материалов в брикеты и последующим спеканием полученных прессовок, пропиткой пористого спеченного карбидного каркаса стальным расплавом [2].

Новизна данной работы заключается в получении карбидостали методом индукционной наплавки, что позволяет получить покрытие разных составов и толщин. Также с помощью индукционной на-

плавки возможно восстановление или модифицирование поверхность различных деталей и инструментов.

В данной работе рассматривается карбидостали из быстрорежущей стали 10P6M5 (80 весовых %) карбид вольфрама WC (20 весовых %). В структуре присутствует ряд твердых растворов. В отличии от стали 10P6M5 наблюдаются обширные карбидные включения с измененной морфологией. В виде ледебуритной эвтектики с угловатыми (скелетными) карбидами характерными для высоковольфрамыстых сталей P18, грубых включений белого и серого цвета. Микроструктура образца представлена на рис. 1.

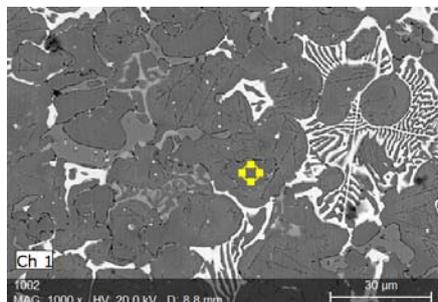


Рис. 1. Микроструктура образца с внесенными карбидами WC

Электронно-микроскопических исследованиях с применением микродифрактометра помогло сделать следующие выводы.

В таблице 1 представлен фазовый состав образца карбидостали с процентным содержанием элементов в отдельных фазах.

Таблица 1

Фазовый состав образца карбидостали

Фазы	W	Mo	Cr	V
1. Твердые растворы содержащие	5.8	2.8	2.8	0.5
2. Твердые растворы содержащие	2.9	1.2	3	0.5
3. Твердые растворы содержащие углерода до 5%	4.2	1.5	1.2	1
4. Карбидную эвтектику скелетной морфологии	23	5.2	3	1.8
5. Отдельные включения карбидов белого цвета	35.4	6	2.1	2.3
6. Отдельные включения карбидов серого цвета	7.2	4.1	8.2	1.4
7. Отдельные включения карбидов светлого цвета	15.9	6.9	3.6	15.6

Наблюдаются как минимум три твердых раствора. Все они достаточно малолегированы (макс. значение – 5,8% W). В одном преобладает вольфрам, в другом хром, в третьем чуть больше ванадия и много углерода (рис. 2). В растворах, обогащенных вольфрамом и углеродом наблюдаются мартенситные кристаллы.

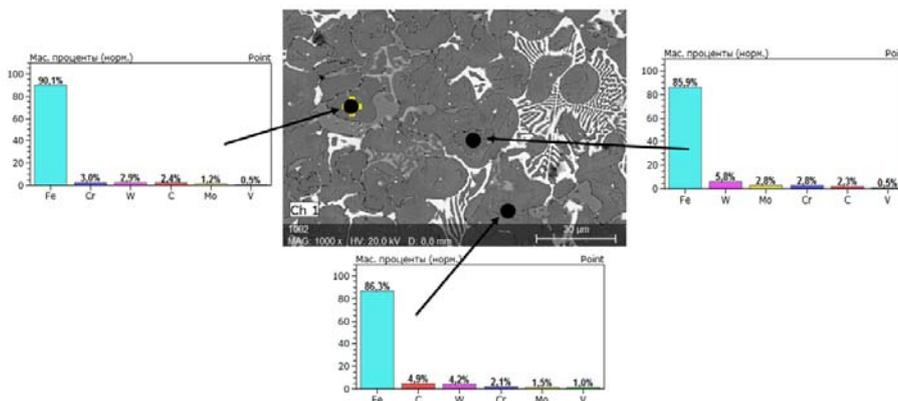


Рис. 2. Микроструктура образца с фазовым составом твердых растворов

В структуре наблюдаются также и включения отдельных угловатых карбидов белого цвета. Они весьма обогащены вольфрамом (до 35,4%) и очевидно представляют собой нерастворившуюся фазу WC, внесенную в шихту.

Присутствуют обширные включения серых карбидов с повышенным содержанием хрома (до 8.2%). Вероятно, это карбиды цементитного типа  $M_3C$ , либо  $FeW_3C$  (рис. 3).

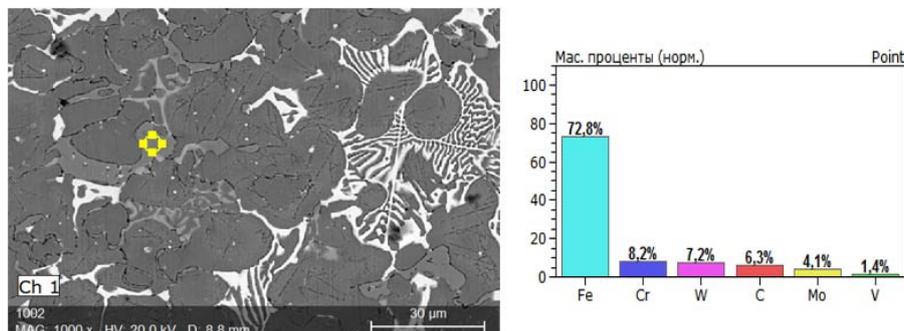


Рис. 3. Микроструктура образца с внесенными карбидами. Состав карбидов серого цвета.

В данной работе показано:

1. Возможность использования индукционной наплавки для получения карбидостали на основе быстрорежущей стали 10P6M5 с добавками карбида вольфрама WC.

2. Определены основные фазы, формирующиеся в карбидостали и их химический состав. Они представляют собой ряд твердых растворов различного состава и ряд карбидных фаз, что существенно отличает структуру полученного материала от структуры обычной быстрорежущей стали.

3. Выявлено существенное влияние технологии и состава направляемой шихты на структуру получаемой карбидостали. Отмечается повышенное количество карбидной фазы, что может существенно повысить износостойкость материала.

#### Библиографические ссылки

1. Свистун Л. И., Карбидостали конструкционного назначения: изготовление, свойства, применение (Обзор) // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. №. 3. С. 41–50.

2. Кульков С.Н., Гнусов С.Ф., Карбидостали на основе карбидов титана и вольфрама. Томск: 2006. // Издательство научно-технической литературы, 2006. С. 240.

#### References

1. Svistun L. I., Carbide steels, of structural purpose: manufacture, properties, application (Review) // Izvestia of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings. 2009. №. 3. p. 50.

2. Kulkov S.N., Gnusov S.F., Carbide steels based on titanium and tungsten carbides. Tomsk: 2006. // Publishing house of scientific and technical literature, 2006. p. 240.

© Климов С. А., Носков Ф. М., 2023

УДК 65.011.56

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

И. С. Кондаков\*, М. А. Агафонов, А. А. Пельмская, А. Е. Шинко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: komdakigor2001@yandex.ru

*Приведены сферы использования углепластика и его физико-механическим показатели. Перечислены способы его производства и примеры применения в космической промышленности. Описаны способы автоматизации выкладки препрега.*

*Ключевые слова: автоматизация, углепластик, мобильный робот, космическая промышленность.*

## AUTOMATION DEVICE FOR THE PRODUCTION OF LARGE-SIZED CARBON FIBER PRODUCTS

I. S. Kondakov\*, M. A. Agafonov, A. A. Pelymskaya, A. E. Shinko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: komdakigor2001@yandex.ru

*The spheres of use of carbon fiber and its physical and mechanical indicators are given. The methods of its production and examples of its application in the space industry are listed. The methods of automating the prepreg layout are described.*

*Keywords: automation, carbon fiber, mobile robot, space industry.*

Область применения изделий из углепластиков охватывает почти все сферы промышленности. К данным сферам относятся автомобилестроение, энергетическая промышленность, авиастроение, а также космическая промышленность. Такой большой охват разнообразных сфер возможен благодаря физико-механическим показателям углепластика, которые в зависимости от назначения изделия могут иметь различные значения, наиболее подходящие для заданных условий эксплуатации [1]. К таким показателям относятся: прочность, модуль упругости, электрическое сопротивление, биологическая и химическая устойчивость, а плотность. Особенно следует выделить из этого списка высокие показатели прочности и модуля упругости при низкой плотности, что делает их очень востребованными в авиационной и космической промышленности [2].

На данный момент разработано несколько способов изготовления углепластика: литье под давлением, экструзия, штамп-прессование, вальцевание, каландрование, вибрационное прессование и литье, вакуумная пропитка, выкладка препрега и другие [3-4]. Каждый из этих способов имеет свои особенности и предназначен для производства определенных типов изделий. Одним из подходящих способов производства углепластика для сферы космической промышленности является выкладка препрега. Суть этой технологии заключается в укладывании под давлением лент, состоящих из углеродных волокон и связующего материала, на технологическую оснастку. Данный метод подходит для формирования крупногабаритных изделий, таких как: обшивка ракеты, рефлектор, основа солнечной батареи и других.

Выкладка препрега проста в использовании и может быть произведена вручную, но из-за вреда пыли углепластика для здоровья, требований к точности и постоянному давлению выкладки данный метод следует автоматизировать. На данный момент разработано несколько технологий автоматизированной выкладки препрега. Две уже устоявшиеся технологии ATL и AFP уже давно освоены и ши-

роко применяются на производстве. Но также разрабатываются новые методы, например, технологии переноса слоев препрега с плоской поверхности на технологическую оснастку [5].

Перечисленные выше технологии как правило используются на базе промышленных роботов или порталных станков, которые имеют такой недостаток, как ограниченная рабочая область. Для решения данной проблемы можно использовать мобильного робота, основание которого представляет собой подвижную платформу, перемещающуюся с помощью всенаправленных колес. Данное устройство может формировать изделие из углепластика любых габаритов, и ограничено только размерами технологической оснастки. Данный метод позволит уменьшить количество используемых деталей из углепластика, что в свою очередь уменьшит количество стыков, в местах которых показатели углепластика ухудшаются.

Таким образом одним из оптимальных способов производства крупногабаритных изделий из углепластика является использование устройства на базе мобильного робота с применением одной из разработанных технологий.

### Библиографические ссылки

1. Углепластики в современном мире: их свойства и применение / Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В. и др. // *Успехи в химии и химической технологии*. 2019. Т. 33. №6 (216). С. 62-64.
2. Гуляев И.Н., Павловский К.А. Высокомодульные углепластики для изделий гражданской авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2023. №3 (121). С. 95-105.
3. Дворянкин А.О., Дворянкин О.А. Технология деталей, изготовленных из полимерных композиционных материалов // *Наука России: Цели и задачи : сборник научных трудов по материалам XXV международной научной конференции*. Ч. 1. Международная Объединенная Академия Наук. Екатеринбург. 2021. С. 124-128.
4. Особенности изготовления термостойких углепластиков и изделий из них / Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И. и др. // *Конструкции из композиционных материалов*. 2016. №1 (141). С. 34-40.
5. Роботизированная выкладка препрега как альтернатива технологиям ATL и AFP / Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Григорьева Л.Н. и др. // *Труды ВИАМ*. 2021. №3 (97). С. 87-98.

### References

1. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. [Carbon fiber plastics in the modern world: their properties and application]. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2019. Vol. 33. No. 6 (216). pp. 62-64.
2. Gulyaev I.N., Pavlovsky K.A. [High-modulus carbon fiber plastics for civil aviation products]. *Proceedings of VIAM*. 2023. No.3 (121). pp. 95-105.
3. Dvoryankin A.O., Dvoryankin O.A. [Technology of parts made of polymer composite materials]. *Russian Science: Goals and objectives : collection of scientific papers based on the materials of the XXV International Scientific Conference. Part 1. International United Academy of Sciences*. Yekaterinburg. 2021. pp. 124-128.
4. Zelenina I.V., Gulyaev I.N., Kucherovsky A.I., Mukhametova R. R. [Features of the manufacture of heat-resistant carbon fiber plastics and products from them]. *Structures made of composite materials*. 2016. No.1 (141). pp. 34-40.
5. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Grigorieva L.N., Grigorieva N.L., Khrulkov A.V. [Robotic prepreg layout as an alternative to ATL and AFP technologies]. *Proceedings of VIAM*. 2021. No.3 (97). pp. 87-98.

© Кондаков И. С., Агафонов М. А., Пельмская А. А., Шинко А. Е., 2023

УДК 621

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ FDM ПЕЧАТИ ПЛАСТИКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

С. А. Криволицкий\*, Т. Г. Орешенко, С. И. Кулагина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: semakr2014@gmail.com

*В данной статье рассмотрены особенности FDM печати пластиком различных производителей. Практическая значимость исследования обусловлена повсеместным внедрением технологий 3D печати в различных сферах деятельности человека.*

*Ключевые слова: пластик, 3D печать, дефект, подготовка модели.*

## IMPROVING THE TECHNOLOGY OF FDM PRINTING WITH PLASTICS FROM VARIOUS MANUFACTURERS

S. A. Krivolutsky \*, T. G. Oreshenko, S. I. Kulagina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: semakr2014@gmail.com

*This article discusses the features of FDM printing with plastics from various manufacturers. The practical significance of the research is due to the widespread introduction of 3D printing technologies in various fields of human activity.*

*Keywords: plastic, 3D printing, preparing the model.*

3D печать – это процесс создания трехмерных объектов из цифровой модели [1]. Технологию 3D печати можно разделить на несколько этапов:

1. Создание цифровой модели.
2. Подготовка модели для печати.
3. Печать.
4. Постобработка.

В данной статье мы рассмотрим зависимость качества печати от выбора материала. Все тесты будем проводить на принтере FlyingBear Ghost 5. Для сравнения возьмём пластик от разных производителей и разных цветов, так как цвет пластика также оказывает влияние на качество печати. Преимущественно будем использовать PLA пластик из-за высокой точности печати, малой усадки и дешевизны, а также рассмотрим ABS пластик от фирмы BESTFILAMENT для проведения сравнительного анализа и чистоты эксперимента [3].

В работе будем использовать пластики от следующих производителей: Steozone (зелёный, красный); Eguone (красный); НИТ (белый); R3D (синий, черный, двухцветный); Комплектный (белый).

Температура сопла – 205°C, температура стола – 60°C, заполнение – 20%, скорость печати – 60 мм/с, скорость печати первого слоя – 30 мм/с, скорость печати ретрактов – 45 мм/с, скорость подачи пластика – 10 мм/с, диаметр сопла – 0,4 мм, толщина стенок – 1,6 мм [2].

Наилучшим образом в ходе испытаний себя показал пластик НИТ белого цвета. Данный пластик изготавливается из переработанных материалов, что делает его экологичнее конкурентов. НИТ – отечественный производитель пластика, что делает его продукцию наиболее предпочтительной на территории РФ.

Сравнительные характеристики печати образцов разных сортов пластика

Наименование пластика		Остаточный пластик в вырезах символов	Искажение формы символа на верхней грани	Неравномерная усадка пластика	Неровное нижнее основание	Дефект отрыва пластика	Пониженная спекаемость слоёв	Расщепление слоёв по граням	Щели на основаниях	Зазоры, мм
Creozone	зеленый	+	+	+	-	-	-	-	+	0,2
	красный	+	+	+	-	-	+	-	-	0,15
Egypone	красный	-	-	+	-	-	-	+	+	0,15
Комплектный	белый	+	-	+	-	+	+	-	+	0,1
НИТ	белый	+	-	+	-	-	-	-	-	0,1
R3D	синий	+	+	+	-	+	+	+	+	0,15
	черный	+	+	+	-	+	+	+	+	0,2
	двухцветный	+	+	+	-	+	+	+	+	0,15

### Библиографические ссылки

1. Рэдвуд Б., Шофер Ф., Гаррэт Б. 3D-печать. Практическое руководство / пер. с англ. М.А.Райтмана. М.: ДМК Пресс, 2020. 220 с.: ил.
2. Ременяк, Р. А. Технология и материалы 3D-печати / Р. А. Ременяк. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2020. № 8 (298). С. 48-52. <https://moluch.ru/archive/298/67490/>.
3. Зиомковская П. Е., Грязнов А. О., Козубский А. М., Определение модуля упругости ABS и PLA-пластиков, используемых в технологиях 3D-печати. Текст: непосредственный // Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс».

### References

1. Redwood B., Chauffeur F., Garret B. 3D printing. Practical guide / translated from the English by M.A.Reitman. M.: DMK Press, 2020. 220 p.: ill.
2. Remenyak, R. A. Technology and materials of 3D printing / R. A. Remenyak. Text: direct // Young scientist. 2020. № 8 (298). Pp. 48-52. <https://moluch.ru/archive/298/67490>
3. Ziomkovskaya P. E., Gryaznov A. O., Kozubsky A.M., Determination of the elastic modulus of ABS and PLA plastics used in 3D printing technologies. Text: direct // Center for Scientific cooperation "Interactive plus".

© Криволицкий С. А., Орешенко Т. Г., Кулагина С. И., 2023

УДК 620.18

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ WAAM ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВАРНОГО ВАЛИКА

О. Р. Лузанов<sup>1,3,\*</sup>, А. А. Снежко<sup>1,2</sup>, В. В. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Северная, 1

<sup>3</sup> Красноярский индустриально-металлургический техникум  
Российская Федерация, 660073, г. Красноярск, ул. Тельмана, 32

\*E-mail: 2155453@mail.ru

*В работе представлен обзор аддитивной технологии, основанной на печати металлической проволокой. Рассмотрен ряд особенностей послойного синтеза – перспективного производственного процесса для промышленного комплекса, в том числе авиа- и ракетостроения.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, технологические параметры.*

## TECHNOLOGICAL ASPECTS OF WAAM WHEN FORMING A WELDED ROLLER

O. R. Luzanov<sup>1,3,\*</sup>, A. A. Snezhko<sup>1,2</sup>, V. V. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Fire and Rescue Academy  
1, Severnaya str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation

<sup>3</sup> Krasnoyarsk Industrial Metallurgical College  
32, Telman str., Krasnoyarsk, 660073, Russian Federation

\*E-mail: 2155453@mail.ru

*The paper presents an overview of additive technology based on metal wire printing. A number of features of layer-by-layer synthesis, a promising production process for the industrial complex, including aviation and rocket engineering, are considered.*

*Keywords: additive technologies, technological parameters.*

В последние годы проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM) все чаще привлекает внимание промышленного сектора благодаря своей способности создавать металлические компоненты с высокой скоростью осаждения, низкой стоимостью оборудования, высоким коэффициентом использования материалов и экологичностью [1].

Аддитивное производство (AM) появилось как технология, позволяющая автоматизировать ремонт и восстановление изношенных изделий, особенно дорогостоящих деталей в новых современных условиях для следующего жизненного цикла [2]. Восстановление и ремонт деталей приобретает все большее значение как один из важнейших элементов для реализации ресурсосберегающих промышленных секторов и экономики замкнутого цикла [3, 4].

В данном направлении проводится много исследований, однако технологические режимы не отрабатаны. Большинство исследователей оптимизируют технологические параметры на известных сварочных материалах, например, стальной проволоке Св-08Г2С.

Образцы наплавки из стальной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм изготавливали с помощью универсального робота-манипулятора ABB IRB 1600 и сварочного аппарата EWM PHOENIX 352

Expert 2.0 puls MM с инверторным источником роботизированной сварки MIG. Инверторный источник роботизированной сварки MIG – модульный с импульсным режимом работы в защитной среде смеси газов (Ar-80% и CO<sub>2</sub>-20%). Линейные размеры измеряли штангенинструментом (погрешность 0,1 мм), температуру – пирометром FinePower DIN21H.

Приведенный источник питания характеризуется особенностью взаимной корреляции напряжения, силы тока, скорости подачи проволоки и ее диаметра. Действительно, при варьировании одного из данных параметров происходит автоматическое регулирование других. В качестве исходного параметра была выбрана скорость подачи проволоки. На рис. 1 представлены образцы, сформированные из 10 слоев при разных значениях сварки и подачи проволоки.



Рис. 1. Образцы, сформированные дуговой наплавкой (10 слоев):

- 1 – V сварки = 5,5 мм/с, V подачи проволоки =3,0 м/мин
- 2 – V сварки = 5,5 мм/с, V подачи проволоки =3,0 м/мин
- 3 – V сварки = 6,5 мм/с, V подачи проволоки =3,0 м/мин
- 4 – V сварки = 5,5 мм/с, V подачи проволоки =3,3 м/мин
- 5 – V сварки = 6,5 мм/с, V подачи проволоки =3,3 м/мин

Наши исследования проводились примерно в тех же диапазонах технологических параметров в работах других авторов по наплавке сварочной проволоки методом WAAM [5], как показано в сводной табл. 1 (Стамбульский университет имени Гедика). В качестве оборудования в работе [5] используется сварочный робот OTC Daihen FD-V8L и источник питания GeKaMac Power MIG GPS WB P500L.

Таблица 1

**Параметры сварки для печати металлической проволокой**

Параметры процесса	Единица измерения	ER 70 S-6 (аналог Св-08Г2С) [5]	ER 316 L (аналог Св-04X19H11M3) [5]	Св-08Г2С
Напряжение	В	14.6	15.3	19.1
Сила тока	А	132	150	125
Диаметр проволоки	мм	1.2	1.2	1.2
Скорость перемещения (скорость сварки)	см/мин	50	50	33÷39
Угол наклона горелки	градусов	90	90	90
Температура между проходами	°С	30	30	-
Защитный газ	-	82% Ar +18% CO <sub>2</sub>	97.5% Ar +2.5% CO <sub>2</sub>	80% Ar +20% CO <sub>2</sub>
Расход газа	л/мин	15	15	12

В ходе проведенных исследований установлены технологические особенности WAAM формирования геометрии наплавочных слоев, связанные с параметрами сварочной дуги, подачи проволоки и теплоотведения:

1. Оборудование позволяет взаимно коррелировать напряжение, силу тока, скорости подачи проволоки и ее диаметра, что в совокупности влияет на скорость сварки, геометрию и свойства образцов.
2. В процессе послойного синтеза высота стенки равномерно возрастает, а ширина стабилизируется при каждом установленном значении скорости сварки.
3. С ростом скорости сварки высота образцов снижается.

Влияние температурного градиента на структуру и механические свойства стенки будет изучено в следующих работах для расширенного диапазона скоростей сварки, что позволит оптимизировать технологический процесс восстановления деталей.

Возможности аддитивной технологии также могут быть расширены за счет применения разнородных материалов печати как основы перспективных композиционных материалов, что и будет дальнейшим направлением для исследований.

### Библиографические ссылки

1. Обзор технологии электродугового аддитивного производства металлов: свойства, дефекты и повышение качества [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/327154136\\_A\\_review\\_of\\_the\\_wire\\_arc\\_additive\\_manufacturing\\_of\\_metals\\_properties\\_defects\\_and\\_quality\\_improvement](https://www.researchgate.net/publication/327154136_A_review_of_the_wire_arc_additive_manufacturing_of_metals_properties_defects_and_quality_improvement) (дата обращения: 03.9.2023).

2. Прогресс в аддитивном производстве и быстром прототипировании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607632405> (дата обращения: 03.09.2023).

3. Систематический обзор методов восстановления компонентов на основе аддитивного производства [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/368654881\\_A\\_systematic\\_review\\_of\\_additive\\_manufacturing-based\\_remanufacturing\\_techniques\\_for\\_component\\_repair\\_and\\_restoration](https://www.researchgate.net/publication/368654881_A_systematic_review_of_additive_manufacturing-based_remanufacturing_techniques_for_component_repair_and_restoration) (дата обращения: 03.9.2023).

4. Аддитивное производство для ремонта и реставрации при восстановительном производстве: обзор с точки зрения проектирования объектов и систем [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/11/802> (дата обращения: 03.9.2023).

5. РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РОБОТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА [Электронный ресурс]. URL: [https://web.archive.org/web/20220206203555id\\_/https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2118853](https://web.archive.org/web/20220206203555id_/https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2118853) (дата обращения: 03.9.2023).

### References

1. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/327154136\\_A\\_review\\_of\\_the\\_wire\\_arc\\_additive\\_manufacturing\\_of\\_metals\\_properties\\_defects\\_and\\_quality\\_improvement](https://www.researchgate.net/publication/327154136_A_review_of_the_wire_arc_additive_manufacturing_of_metals_properties_defects_and_quality_improvement) (accessed 03.9.2023).

2. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607632405> (accessed 03.9.2023).

3. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/368654881\\_A\\_systematic\\_review\\_of\\_additive\\_manufacturing-based\\_remanufacturing\\_techniques\\_for\\_component\\_repair\\_and\\_restoration](https://www.researchgate.net/publication/368654881_A_systematic_review_of_additive_manufacturing-based_remanufacturing_techniques_for_component_repair_and_restoration) (accessed 03.9.2023).

4. Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/11/802> (accessed 03.9.2023).

5. DEVELOPMENT OF MULTI-MATERIAL COMPONENTS VIA ROBOTIC WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING. Available at: [https://web.archive.org/web/20220206203555id\\_/https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2118853](https://web.archive.org/web/20220206203555id_/https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2118853) (accessed 03.9.2023).

© Лузанов О. Р., Снежко А. А., Кузнецов В. В., 2023

УДК 669. 715-17

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА РАЗМЕР ЗЕРНА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

А. В. Моружко\*, А. А. Концеренко, М. П. Жуков, Н. А. Терентьев

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660025, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95  
\* E-mail: krestyanko1993@icloud.com

*Исследована возможность использования технологии бесслитковой прокатки-прессования для получения лигатурных прутков из технического алюминия марки А85, из сплава марки АД31 и сплава системы Al-Ti-B. Модифицирование с использованием таких прутков сопровождается измельчением зерна и получением однородного зёрненного строения слитков алюминиевых сплавов.*

*Ключевые слова: лигатурный пруток, технологии бесслитковой прокатки-прессования, микроструктура слитков алюминиевых сплавов, модифицирующая способность.*

## INFLUENCE OF VARIOUS MODIFIERS ON THE GRAIN SIZE OF ALUMINUM AND ITS ALLOYS

A. V. Moruzhko\*, A. A. Kontserenko, M. P. Zhukov, N. A. Terentyev

Siberian Federal University  
95, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation  
\* E-mail: krestyanko1993@icloud.com

*The possibility of using the technology of non-ingot rolling-pressing to produce alloy rods from technical aluminum grade A85, from an alloy of grade AD31 and an alloy of the Al-Ti-B system was investigated. Modification using such rods is accompanied by grain refinement and obtaining a homogeneous grain structure of aluminum alloy ingots.*

*Keywords: alloy rod, ingotless rolling-pressing technologies, microstructure of aluminum alloy ingots, modifying ability.*

Модифицирование микроструктуры слитков непрерывного литья алюминиевых сплавов, производится лигатурой на основе системы Al-Ti-B, в основном, поставляемой из-за рубежа. Известны работы отечественных исследователей по разработке технологии получения модифицирующих прутков системы Al-Ti-B [1, 2], однако до сих пор лигатуры высокого качества, сопоставимые с зарубежными, в России не производятся.

Получение прутков по традиционным технологиям с большим количеством промежуточных операций и использованием энерго- и металлоемкого оборудования, приводит к высокой себестоимости продукции и низкой конкурентоспособности. Перспективным является метод быстрой кристаллизации-деформации расплава металла [3], реализованный в технологии бесслитковой прокатки-прессования (БПП) [4], как традиционных прутков системы Al-Ti-B, так и прутков из алюминия и его сплавов [3, 5].

Исследование модифицирующей способности лигатурных прутков диаметром 9 мм из технического алюминия марки А85, из сплава марки АД31 и сплава системы Al-Ti-B, полученных по технологии БПП проводили по методике Алкан-теста. Для сравнительной оценки в качестве модификатора использовали проволоку из стружки и профиль из сплава АД31, а также лигатуру Al-Ti-B производства КВМ. Полученные результаты представлены в табл. 1, 2.

Анализ результатов (табл. 1) показал, что при кристаллизации расплава технического алюминия марки А7, модифицированного с использованием прутка, полученного по технологии БПП из алю-

миния марки А85, наблюдается измельчение зерен до 0,3 мм. В структуре сохраняются тонкие столбчатые кристаллы, длиной до 2,5 мм.

При кристаллизации расплава алюминиевого сплава АД31 без использования модификатора большую часть слитка занимают столбчатые кристаллы, достигающие длины 7 мм. В центральной части сформировались равноосные зерна размером ~ 0,97 мм (табл. 2). Введение в расплав АД31 прутка из того же сплава в количестве 3-4 %, полученного методом БПП, уменьшает размер зерен до 0,35 мм.

Таблица 1

Результаты оценки модифицирующей способности прутков в алюминии А85

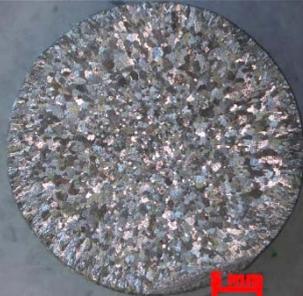
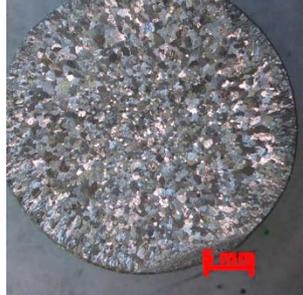
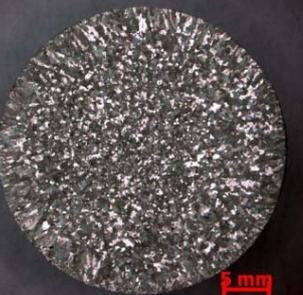
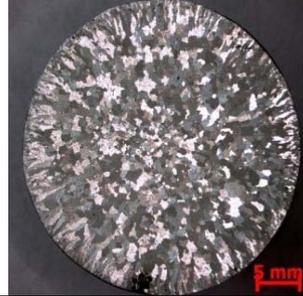
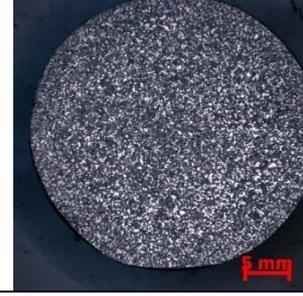
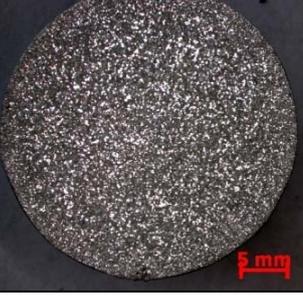
Условия эксперимента	Макроструктура	Условия эксперимента	Макроструктура
Исходный материал – расплав алюминия марки А7		В расплав алюминия марки А7 вводится пруток после БПП из алюминия марки А85 (3-4%); через 3 мин отбирается проба	

Таблица 2

Результаты оценки модифицирующей способности прутков в сплаве АД31

Условия эксперимента	Макроструктура	Условия эксперимента	Макроструктура
Исходный материал – расплав алюминиевого сплава АД31		В расплав алюминиевого сплава АД31 вводится пруток БПП из сплава АД31 (3-4%); через 3 мин отбирается проба	
В расплав алюминиевого сплава АД31 вводится проволока из стружки сплава АД31 (3-4%); через 3 мин отбирается проба		В расплав алюминиевого сплава АД31 вводится профиль из сплава АД31 (3-4%); через 3 мин отбирается проба	
В расплав алюминиевого сплава АД31 вводится пруток из Al-Ti-B, полученный БПП (0,0018%); через 30 с отбирается проба		В расплав алюминиевого сплава АД31 вводится пруток из Al-5Ti-1B (0,001%) производства КВМ; через 30 с отбирается проба	

Модифицирование прутком из Al-Ti-B, полученного методом БПП в расплав алюминия АД31, приводит к измельчению зерна и получению однородного зеренного строения с размером  $\sim 0,21$  мкм. Аналогичный модифицирующий эффект получился при использовании лигатуры Al-5Ti-1B производства КВМ.

Таким образом, технология БПП обеспечивает формирование особой внутренней структуры лигатурного прутка, позволяющей достигать модифицирующего эффекта в слитках из алюминия и его сплавов.

### Библиографические ссылки

1. Пат. 2044089 Российская Федерация, МПК С22С 1/02. Способ получения лигатуры алюминий-титан-бор / Шпаков В.И., Никитин В.М., опубл. 1995.09.20–2с.
2. Пат. 2110597 Российская Федерация, МПКС22С1/02. Способ получения прутковой лигатуры алюминий-титан-бор / Галиева Л.В., Иванова Н.В., Никитин В.М., Ношик А.И., Разумкин В.С., Севрюков В.С., Трифоненков Л.П., Шпаков В.И, опубл. 10.05.1998 4 с.
3. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации-деформации и модифицировании алюминиевых сплавов / С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, Н. Н. Довженко и др. Красноярск: Сиб. федер.ун-т, 2015. 180 с.
4. Пат. 2724758. Российская Федерация. Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла / Сидельников С.Б., Старцев А.А., Гильманшина Т.Р. [и др.], опубл. 25.06.2020, Бюл. №18.
5. Пат. 2257419. Российская Федерация. Способ получения модифицирующих материалов для алюминия и его сплавов / Климко А. П., Биронт В. С., Сидельников С.Б. [и др.], опубл. 2005, Бюл. № 21.

### References

1. Shpakov V. I., Nikitin V. M. Method for producing aluminum-titanium-boron alloy. Patent RF, no. 2044089, 1995.
2. Galieva L. V., Ivanova N. V., Nikitin V. M., Noshchik A. I., Razumkin V. S., Sevryukov V. S., Trifonenkov L. P., Shpakov V.I. Method for producing aluminum-titanium-boron rod alloy. Patent RF, no. 2110597, 1998.
3. Sidelnikov S. B., Lopatina E. S., Dovzhenko N. N. [Features of structure formation and properties of metal during high-speed crystallization-deformation and modification of aluminum alloys]. Krasnoyarsk: Sib. Federal University, 2015, 180 p.
4. Sidelnikov S. B., Startsev A. A., Gilmanshina T. R. Device for non-ingot rolling and pressing of metal. Patent RF, no. 2724758, 2020.
5. Klimko A. P., Biront V. S., Sidelnikov S. B. Method for obtaining modifying materials for aluminum and its alloys. Patent RF, no. 2257419, 2005.

© Моружко А. В., Концеренко А. А., Жуков М. П., Терентьев Н. А., 2023

УДК65.011.56

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРТАЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТ

А. А. Пельмская\*, И. С. Кондаков, М. А. Агафонов, А. Е. Шинко, Л. В. Ручкин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\* E-mail: alyona.pelymskaya2@mail.ru

*Мы рассмотрели использование порталных манипуляторов для изготовления ракет.*

*Ключевые слова: порталные манипуляторы, производство, ракеты.*

## THE USE OF PORTAL MANIPULATORS IN THE MANUFACTURE OF ROCKET PARTS

A. A. Pelymskaya\*, I. S. Kondakov, M. A. Agafonov, A. E. Shinko, L. V. Ruchkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\* E-mail: alyona.pelymskaya2@mail.ru

*We considered the use of portal manipulators for the manufacture of rockets.*

*Keywords: portal manipulators, production, rockets.*

Уровень развития страны можно определить по наличию природных ресурсов, экономической развитости и наличию интеллектуальных ресурсов. Касаясь последнего аспекта, утверждается, что ракетостроение – это отрасль, которая показывает уровень интеллектуальных ресурсов государства, а, следовательно, и уровень развития страны [1].

Ракетостроение как производство требует огромных точностей. Даже малейшие отклонения от допустимых погрешностей могут привести к невозможности нормально функционирования летательного аппарата. Но также важно, чтобы производство не было сильно трудоемким. В данной статье мы рассмотрим возможность использования порталных манипуляторов для уменьшения трудоемкости производства ракетополетителей [2,3].

Портальный манипулятор – это устройство, состоящее из подвесной системы, которая обеспечивает линейное движение, и привода, к которому производится крепление рабочего органа [4].

Рассматривая производство ракетополетителей, любой может сказать, что речь идет о больших габаритах заготовок и деталей. В промышленном масштабе их перемещение нужно осуществлять своевременно для максимизации использованного времени производства. В этом вопросе было бы разумно обратить внимание на одну особенность порталных манипуляторов: функционирование порталных манипуляторов не зависит от площади пола. Так же плюсом можно считать относительно большую грузоподъемность и наличие возможности работы с крупногабаритными объектами у манипуляторов такого типа. Тем самым мы обеспечим перемещение обрабатываемых частей без возникновения «стопорения» других процессов производств. Портальные манипуляторы, в основном предназначены для операций захвата и размещения, но также могут использоваться для ряда других целей.

Возможен и другой подход к использованию порталных манипуляторов на производстве деталей ракет: использование лазерной резки. Для этого на порталный манипулятор крепится лазерная головка для работы на листовом металле, устанавливается необходимое программное обеспечение и прикрепляется основание. Тем самым манипулятор становится станком для лазерной резки. Порталь-

ные манипуляторы обладают высокой точностью позиционирования. Это создает хорошую базу для работы над заготовками ракетоносителей.

Далее обратим внимание на современные тенденции в создании ракет. Всё большей популярностью пользуется 3D-печать некоторых деталей. [5]. Для 3D-печати в основном используются портальные манипуляторы или станки, к которым крепится вместо рабочего органа печатающий элемент с необходимым для функционирования дополнительным оборудованием.

В результате проведенных поисков были найдены возможности использования портальных манипуляторов для уменьшения трудоемкости производства ракетоносителей. Приведенные способы использования являются наиболее перспективными с учетом роста интереса государства к развитию и выходу в первенство нашей страны на международной арене в области космических технологий.

### Библиографические ссылки

1. Ракетно-космическая промышленность, как наиболее перспективная отрасль наукоемкого высокотехнологического комплекса России /М.В. Фомкина // ГИАБ. 2012. №3. С.405-411.
2. Юмашев Л.П. Устройство ракет-носителей (вспомогательные системы). Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1999. 189 с.
3. StudFiles URL: <https://studfile.net/preview/9431297/> (дата обращения: 11.09.2023).
4. ЭВСробот URL: <https://www.evsint.com/ru/gantry-robot-applications/> (дата обращения: 12.09.2023).
5. Применение технологий 3D-печати в ракетостроительной промышленности / Торгашин А.С., Леонгард А.Ю., Бегишев А.М. и др. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. №11. С. 105-106.

### References

1. M.V. Fomkina [Rocket and space industry as the most promising branch of the high-tech high-tech complex of Russia]. GIAB. 2012. no. 3. p.405-411. (In Russ.).
2. Yumashev L.P. *Ustroistvo raket-nositelei (vspomogatelnie sistemi)* [Device of launch vehicles (auxiliary systems)]. Samar. state. aerospace. un-T. Samara, 1999, 189 p.
3. StudFiles. Available at: <https://studfile.net/preview/9431297/> (accessed: 11.09.2023).
4. EMU robot. Available at: <https://www.evsint.com/ru/gantry-robot-applications> / (accessed 12.09.2023).
5. Torgashin A.S., Leonhard A.Yu., Begishev A.M. and etc. [Application of 3D printing technologies in the rocket industry]. Actual problems of aviation and cosmonautics. 2015. №11.p.105-106. (In Russ.).

© Пелымская А. А., Кондаков И. С., Агафонов М. А., Шинко А. Е., Ручкин Л. В., 2023

УДК 621.9

## АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

А. С. Причина, К. С. Тюрин, А. В. Скрипка, Л. П. Сысоева, Е. В. Раменская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: rex01111111111111111111@gmail.com

*Разработанный алгоритм позволяет определить последовательность написания управляющих программ для изготовления концевых фрез на шлифовально-заточных станках.*

*Ключевые слова: концевая фреза, шлифовально-заточной станок, алгоритм, управляющая программа.*

## ALGORITHM FOR DEVELOPING CONTROL PROGRAMS FOR THE MANUFACTURE OF END MILLS

A. S. Prichina, K. S. Tyurin, A. V. Skripka, L. P. Sysoyeva, E. V. Ramenskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: rex01111111111111111111@gmail.com

*The developed algorithm makes it possible to determine the sequence of writing control programs for the manufacture of end mills on grinding and sharpening machines.*

*Keywords: end mill, grinding and sharpening machine, algorithm, control program.*

В современных условиях производства задача по обеспечению предприятий ракетно-космической отрасли собственным металлорежущим инструментом является одной из актуальных.

Характеристики применяемого инструмента напрямую влияют на качество выпускаемых изделий и формируются на всех этапах его жизненного цикла, начиная с разработки технического задания, проектирования технологического процесса его изготовления и заканчивая его производством [1, 2]. Повышение качества инструментального производства – задача многоаспектная и многоэтапная. И решать эту задачу необходимо, в том числе, и на этапе обучения операторов шлифовально-заточных станков.

Для сокращения времени обучения и упрощения написания управляющих программ (УП) по изготовлению концевых фрез на шлифовально-заточных станка с ЧПУ [3, 4], в соответствии с последовательностью проводимых операций составлен алгоритм, представленный на рис. 1.

Первый этап составления управляющей программы начинают с обработки винтовых канавок по диаметру (Канавки в сплошном материале), с последующим полированием при необходимости (Полировка канавок). После обработки канавок производят заточку задней поверхности зубьев на диаметре (Чистовая обработка наружного диаметра). Отдельной операцией обработки можно производить приподнятые ленточки (Приподнятая направляющая ленточка).

Вторым этапом проводят обработку торцевой поверхности, в ходе которой прорезают канавки на торце (прорезка торцевой поверхности). Для обеспечения сведения зубьев к центру на торцевой поверхности изготавливают пазы-прорезы (Паз торцевой поверхности). При наличии переходного угла в плане, выполненного под углом или радиусным скруглением, производят угловую или радиусную прорезку соответственно; после данной операции выполняют операцию заточки торцевой поверхности и поверхностей переходного угла по заднему углу (Угол на наружном диаметре (НД) и чистовая

обработка торца). Если на торцевой поверхности отсутствует переходной угол, то заточку производят только по задней поверхности зубьев на торце (Чистовая обработка торца).

В соответствии с конструкторской документацией и разработанным алгоритмом на шлифовально-заточном станке в диалоговом режиме подготавливают управляющую программу для изготовления концевой фрезы, состоящую из операции:

- шлифования стружечных канавок с указанием высоты зуба и переднего угла;
- заточки режущей части по диаметру с заданием параметров заднего угла и длин затылования зуба и ленточки;
- подточки по торцу с установкой угла и длины, а также переднего угла на торце фрезы;
- заточки торца с заданием заднего угла, длины заточки по заднему углу и угла затылования.

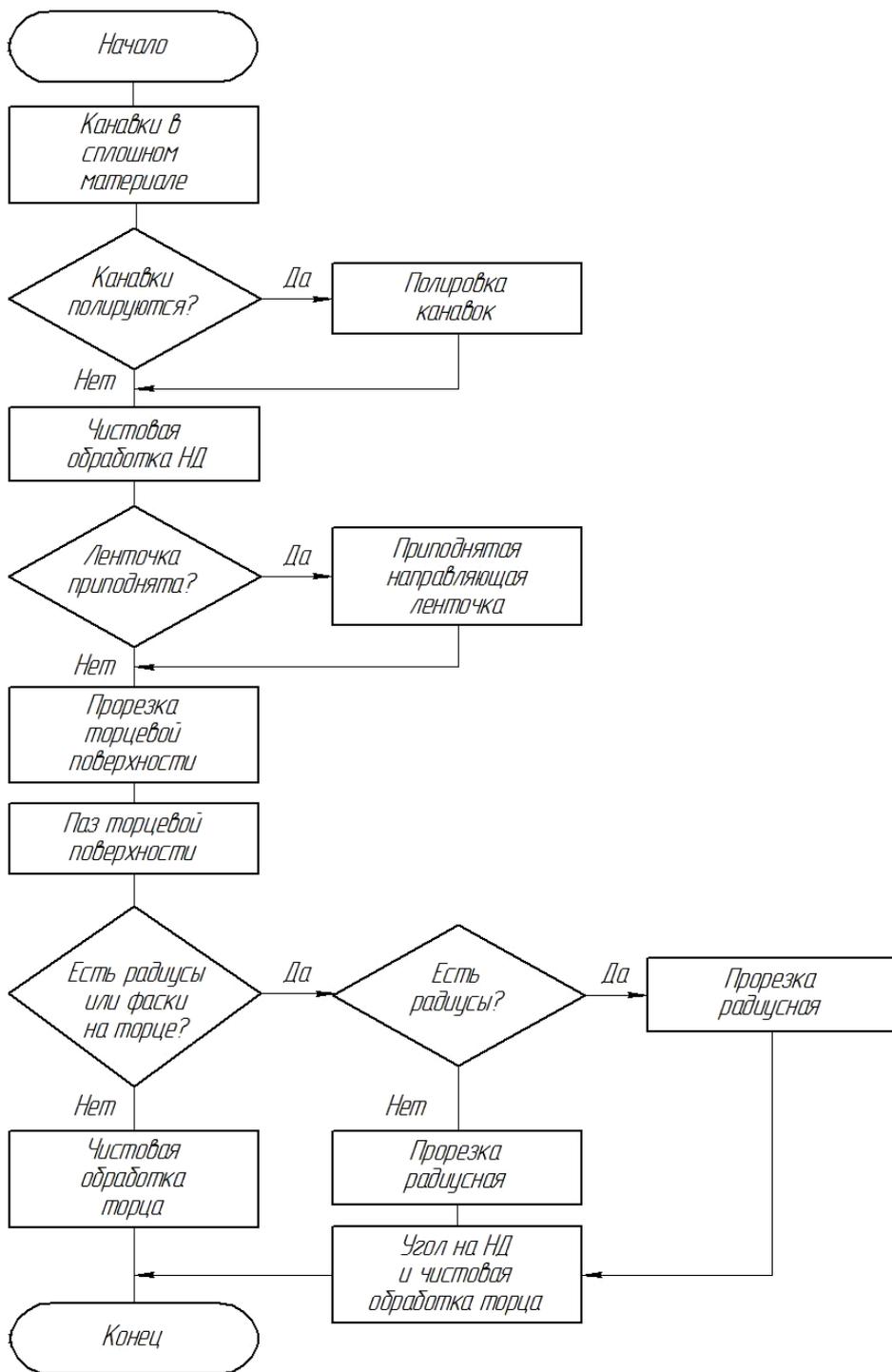


Рис. 1 Алгоритм составления управляющей программы изготовления фрезы

Таким образом, применение разработанного алгоритма позволит сократить трудоемкость написания управляющей программы изготовления фрезы и существенно сократить время обучения операторов шлифовально-заточных станков при написании управляющих программ.

### Библиографические ссылки

1. Матлыгин Г. В. Технологическое обеспечение качества изготовления концевых фрез из быстрорежущей стали на многооперационном станке // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. Иркутск. 2021. С. 153-157.
2. Производство высокопроизводительного режущего инструмента в условиях ИАЗ / К. В. Богданов, А. В. Савилов, Е. П. Николаева, А. Е. Родыгина // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 91-95.
3. Протасьев В. Б., Истоцкий В. В. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ : Монография. М.: ИНФРА-М. 2021. 128 с.
4. Никулин Д. С. Автоматизированное проектирование и изготовление концевых твердосплавных фрез на станках с ЧПУ // Вестник магистратуры. 2014. № 4-1 (31). М.: МГТУ «Станкин». С. 90-95.

### References

1. Matlygin G. V. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva izgotovleniya kontsevykh frez iz bystrorezhushchei stali na mnogooperatsionnom stanke* [Technological quality assurance of high-speed steel end mills manufacturing on a multi-operation machine] // *Zhiznennyy tsikl konstruksionnykh materialov* : Materials XI Russian Scientific Conf "Life cycle of structural materials". Irkutsk. 2021. p. 153-157.
2. *Proizvodstvo vysokoproizvoditelnogo rezhushchego instrumenta v usloviyakh IAZ* [Production of high-performance cutting tools in IAZ conditions] / K. V. Bogdanov, A. V. Savilov, E. P. Nikolaeva, A. E. Rodygina // *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*. 2013. Vol. 1-2. p. 91-95.
3. Protasev V. B., Istotskii V. V. *Proektirovanie fasonnykh instrumentov, izgotavlivaemykh s ispolzovaniem shlifovalno-zatochnykh stankov s ChPU* [Design of shaped tools manufactured using CNC grinding and grinding machines] : *Monografiya*. M.: INFRA-M. 2021. 128 p.
4. Nikulin D. S. *Avtomatizirovannoe proektirovanie i izgotovlenie kontsevykh tverdosplavnykh frez na stankakh s ChPU* [Computer-aided design and manufacture of end carbide cutters on CNC machines] // *Vestnik magistratury*. 2014. Vol. 4-1 (31). M.: MGTU «Stankin». p. 90-95.

© Причина А. С., Тюрин К. С., Скрипка А. В., Сыроева Л. П., Раменская Е. В., 2023

## CALCULATION OF THE PRESSURE REQUIRED FOR CORRUGATION OF THE WAVEGUIDE

V. V. Timofeev\*, I. V. Trifanov, E. V. Patraev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: VT-ak@yandex.ru

*Cross-corrugated shells can be used to create flexible waveguides connecting rigid waveguides. They can compensate for loads during installation, as well as provide temperature compensation and vibration damping.*

*Keywords: waveguide, pressure, mathematical modeling, liquid stamping, cross-corrugated shells.*

## РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ГОФРИРОВАНИЯ ВОЛНОВОДА

В. В. Тимофеев\*, И. В. Трифанов, Е. В. Патраев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: VT-ak@yandex.ru

*Поперечно-гофрированные оболочки могут быть использованы для создания гибких волноводов, соединяющих жесткие волноводы. Они могут компенсировать нагрузки при монтаже, а также обеспечивать температурную компенсацию и демпфирование вибрации.*

*Ключевые слова: волновод, давление, математическое моделирование, штамповка жидкостью, поперечно-гофрированные оболочки.*

To create flexible waveguides, cross-corrugated shells are used, which compensate for mounting stresses and dampen vibrations and temperature changes [1]. Shells with rounded upper and lower parts have the best mechanical and electrical characteristics (Fig. 1, b) [2]. The process of transformation of a rectangular profile pipe billet from BrB2 bronze into a transversely corrugated shell (Fig. 1, a, b), the dimensions of which correspond to the standard [3] (Table 1), is investigated. Corrugation is performed by a liquid punch (Fig. 1, d) on a monolithic matrix, which excludes stress concentration [4]. The fluid pressure is distributed evenly over the entire inner surface of the workpiece, so the same pressure is required to create each corrugation.

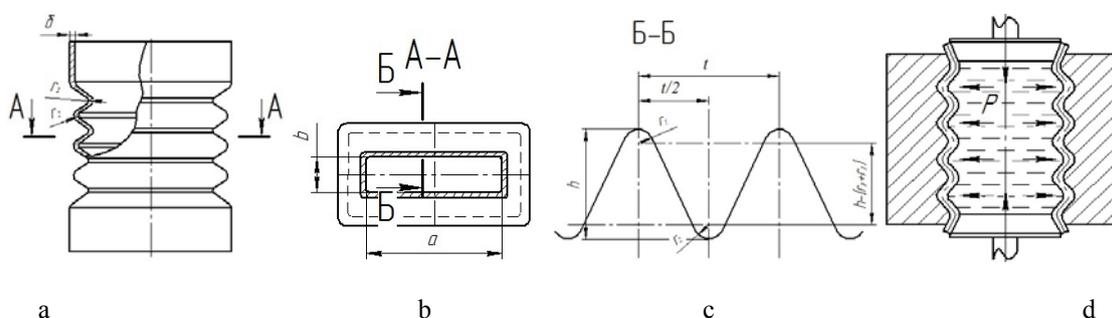


Fig. 1. Corrugated waveguide pipe:

- a) – a section of corrugated seamless pipe; b) the main cross-section dimensions; c) – the shape of the corrugation [2]  
d) – the process of group shaping with a liquid punch on a rigid monolithic matrix

When the wall is deformed, it functions as a beam that is subjected to bending (Fig. 2, a). This is analogous to the situation when the beam is rigidly fixed on both sides and is subjected to a uniform load [5]. The side walls prevent this bending by stretching and lengthening to the height of the corrugation (Fig. 2, b). Consequently, the wall corrugation pressure is the sum of the pressures necessary for bending the walls ( $R_i$ ) and stretching the side walls ( $P_p$ ) and is determined by the formula:

$$P_{sum} = P_i + P_p \tag{2}$$

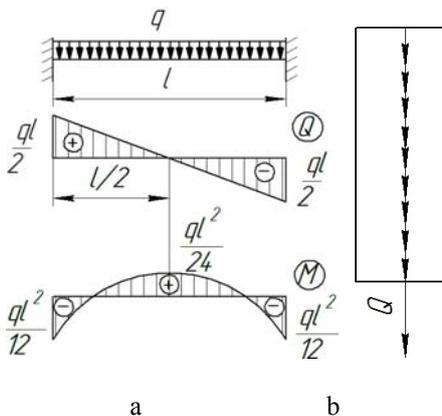


Fig. 2. Exposure scheme:  
a) bending force. b) the tensile force on 2 walls

Table 1

$\delta$ , mm – wall thickness;  $a$ , mm – long wall;  $b$ , mm – short wall;  $R_{gk}$ ,  $R_{gd}$  – pressure for bending short (b) and long (a) walls,  $R_{rk}$ ,  $R_{rd}$  – pressure required for stretching side walls that prevent bending of short (b) wall and long (a) walls,  $R_{sumc}$ ,  $R_{sumd}$  – sumar pressures for deformation of short and long walls

$\delta$ , mm	$a$	$b$	$R_{gk}$ , atm	$R_{rk}$ , atm	$R_{sumc}$ , atm	$R_{gd}$ , atm	$R_{rd}$ , atm	$R_{sumd}$ , atm
0,05	19	9,5	6,057	56,874	62,931	6,057	33,659	39,717
0,05	28,5	12,6	3,246	41,863	45,109	3,246	22,440	25,686
0,05	28,5	12,6	0,946	41,863	42,809	0,946	22,440	23,386
0,08	28,5	12,6	13,297	66,981	80,278	13,297	35,903	49,200
0,08	48	24	0,954	36,020	36,974	0,954	21,318	22,271
0,11	48	24	6,867	49,528	56,394	6,867	29,312	36,178

From Table 1, it can be concluded that the forming pressure during the corrugation of a short wall is the greatest due to the smaller area of pressure exposure and is the desired one. This calculation can be useful in preliminary design. After crimping, residual mechanical stresses occur, which can be detected using the STRESSVISION mechanical stress scanner [6]. For final verification of the quality of production, electrical tests must be carried out, including measurement of SWR and detection of losses in the channel [7].

### References

1. Izgotovlenie gibkikh volnovodov dlya kosmicheskikh apparatov [Manufacture of flexible waveguides for spacecraft]. Available at: <https://tmnp.ru/node/654> (accessed 22.05.2023).
2. Izgotovlenie gofirovannykh volnovodnykh trub [Manufacture of corrugated waveguide pipes]. Available at: <https://studfile.net/preview/1676197/page/9/> (accessed 22.05.2023).
3. GOST 20900–2014. Mezhhgosudarstvennyy. STANDART. Truby volnovodnye mednye i latunnye pryamougol'nye. Tekhnicheskie usloviya. [State Standard 20900–2014. Interstate. standard. Copper and brass rectangular waveguide pipes. Technical conditions]. Vzamen GOST 20900–75; Vved. 2015– 09– 01. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 17 p.

4. Isachenkov E. I. *Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju*. [Rubber and liquid stamping] Moscow: Mashinostroenie, 1967. 367 p.

5. "Spravochnik po soprotivleniyu materialov." chitat' interesnuyu knigu avtora (Pisarenko G.S. i dr.) ["Handbook on the resistance of materials." read an interesting book by the author (Pisarenko G.S. et al.)]. Available at: <https://reallib.org/reader?file=678387&pg=142> (accessed 22.05.2023).

6. *Skанer mekhanicheskikh napryazheniy STRESSVISION®* [Mechanical Stress Scanner STRESSVISION®] Available at: <https://stressvision.ru/> (accessed 22.02.2023).

7. Trifonov I. V., Oborina L. I., Bakina A.M. *Teoreticheskie osnovy postroeniya i metody ispytaniy antenno-fidernykh ustroystv sredstv svyazi, priborov kontrolya i obnaruzheniy* [Theoretical foundations of construction and test methods of antenna-feeder devices of communication means, monitoring and detection devices] textbook. SibGAU. Krasnoyarsk, 2010. 108 p.

### Библиографические ссылки

1. Изготовление гибких волноводов для космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://tmnpo.ru/node/654> (дата обращения: 22.05.2023).

2. Изготовление гофрированных волноводных труб [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/1676197/page:9/> (дата обращения: 22.05.2023).

3. ГОСТ 20900–2014. Межгосударственный. СТАНДАРТ. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия. Взамен ГОСТ 20900–75; Введ. 2015– 09– 01. Москва: Стандартинформ, 2015. 17 с.

4. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.

5. "Справочник по сопротивлению материалов." читать интересную книгу автора (Писаренко Г.С. и др.) [Электронный ресурс]. URL: <https://reallib.org/reader?file=678387&pg=142> (дата обращения: 22.05.2023).

6. Сканер механических напряжений STRESSVISION® [Электронный ресурс]. URL: <https://stressvision.ru/> (дата обращения: 22.02.2023).

7. Трифанов И. В., Оборина Л. И., Бакин А. М. Теоретические основы построения и методы испытаний антенно-фидерных устройств средств связи, приборов контроля и обнаружения : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосмический ун-т. Красноярск, 2010. 108 с.

©. Тимофеев В. В., Трифанов И. В., Патраев Е. В., 2023

УДК 621.372.822

## CALCULATION OF FORCES ARISING DURING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF TWISTING WAVEGUIDES

V. V. Timofeev\*, I. V. Trifanov, D. O. Malyshev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: VT-ak@yandex.ru

*The main purpose of this work is to create twisted wave-guide of antenna-feeder devices of spacecraft with high precision and reliability. In this work we will use profiled rectangular wave-guides.*

*Keywords: twisted wave-guide, wave-guides, torque, plastic deformation, twisting of wave-guides.*

## РАСЧЕТ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ СКРУЧИВАНИИ ВОЛНОВОДА

В. В. Тимофеев\*, И. В. Трифанов, Д. О. Малышев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: VT-ak@yandex.ru

*Для создания волноводных трактов антенно-фидерных устройств космических аппаратов необходимы скрученные волноводы, которые должны быть изготовлены с высокой точностью и надежностью. Для этой цели используются профилированные прямоугольные трубы.*

*Ключевые слова: скрученный волновод, волноводный тракт, крутящий момент, пластическая деформация, скручивание трубных заготовок.*

**Introduction.** Twisted waveguides are elements of waveguide ducts [1], which are used in antenna-feeder systems of spacecraft [2]. A special device for twisting waveguides with a rectangular cross-section of less than 11x5.5 in size was used in this work (Fig. 1). This device was equipped with a rigid swage tool [3].

The calculation was made for twisting tubular rectangular blanks with different cross sections, such as 3,6x1,8; 5,2x2,6; 7,2x3,4 [4].

The calculation model operates under the assumption that the machine evenly applies a load to each section of the workpiece in a sequential manner, resulting in a distributed load on the entire twisted portion of the workpiece (Fig. 2).

Formula (1) determines the torque that occurs when drawing the workpiece using a rigid swage tool [5]:

$$M(l) = -qbl \quad (1)$$

The drawing force required to twist the workpiece is determined by the formula (2):

$$P_{np} = P_{kp} + P_{mp} + P_{mp\phi} \quad (2)$$

Formula (2) includes the components of the effort to create the screw movement of the  $P_{kp}$  (formula 3), overcoming the friction forces in the channel of the spindle  $P_{mp}$  (formula 4) and overcoming the friction forces in the channel of the workpiece  $P_{mp\phi}$  (formula 5) [6]:

$$P_{kp} = \frac{M 2\pi}{B} \quad (3)$$

The letter  $B$  is the pitch of the spiral of the screw twist (0.25 because twisting by  $90^\circ$  requires an incomplete turn by  $1/4$ );

$$P_{mp} = \Pi l_{\text{кал}} f \sigma_{02} \quad (4)$$

$$P_{mp0} = \Pi_{\text{д}} l_{\text{кал}} f \sigma_{02} \quad (5)$$

The letter  $f$  is the coefficient of friction (assumed to be the same for all sections);

The letter  $l_{\text{кал}}$  is the length of the calibration section (equal to the length of the twisted part of the workpiece  $l$ );

The letters  $\Pi$ ,  $\Pi_{\text{д}}$ ,  $m$  are pipe perimeters along the outer and inner contour;

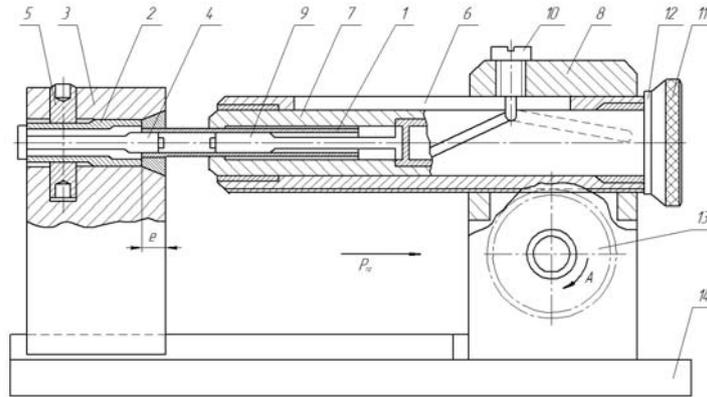


Fig. 1. Device for twisting [3]:

- 1) blank; 2) collet; 3) puppet; 4) mandrel; 5) nut; 6) pinole; 7) spindle; 8) headstock; 9) mandrel; 10) retainer; 11) torsion angle indicator; 12) ring; 13) gear; 14) base

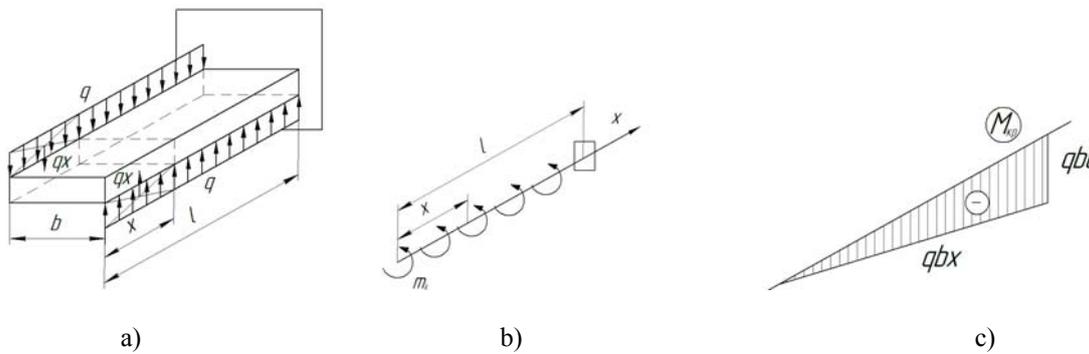


Fig. 2. Diagrams of distributed load generating torque

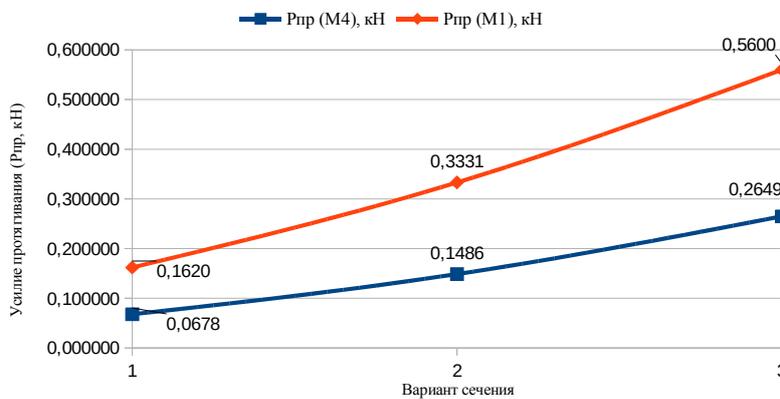


Fig. 3. Graph of pulling forces  $P_{np}$  of a number of sections for workpieces from M1 and M4

According to Figure 3, the following conclusions can be drawn: workpieces from M1 require a greater drawing force  $Pnp$  compared to workpieces from M4, which is due to the high yield strength  $\sigma_{02}$  of M1. The dependences of drawing forces are close to linear, but are not completely linear due to different wall thicknesses according to Russian National Standard (GOST), while the largest thickness (1 mm) for the section 7,2x3,4 respectively allocates torque (M) and drawing force  $Pnp$ , and then sections 5,2x2,6 (0.95 mm wall) and 3,6x1,8 (0.8 mm wall) go downwards. The M1 and M4 graphs have a similar shape, which is due to the same geometry of the workpieces. Manufacturing quality control is supposed to be carried out using the STRESSVISION mechanical stress scanner [7] and electrical tests.

### References

1. Volnovodnyy trakt. [Waveguide path]. Available at: [http://npo-prz.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=66:2011-03-28-13-42-17](http://npo-prz.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=66:2011-03-28-13-42-17) (accessed 22.02.2023).
2. Zlobin S. K., Mikhnev M. M., Laptенок V. D., Bocharov A. N., Dolgopолов B. B. [Features of production of waveguide-distribution paths of antenna-feeder devices of space vehicles]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No 6, P. 196–201 (In Russ.).
3. Zakharov M.A. [Devices and methods of manufacturing twisted sections of waveguides]. *Vestnik NPO «Tekhnomash»*. 2018, No. 8, P. 41–43 (In Russ.).
4. GOST 20900–2014. Mezhhgosudarstvennyy. STANDART. Truby volnovodnye mednye i latunnye pryamougol'nye Tekhnicheskie usloviya. [State Standard 20900–2014. Interstate. standard. Waveguide copper and brass rectangular pipes Specifications.] *Vzamen GOST 20900–75*; *Vved.* 2015– 09– 01. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 17 p.
5. "Soprotivlenie materialov" chitat' interesnuyu knigu avtora (Pisarenko G.S. (red.)) ["Resistance of materials" read an interesting book by the author (Pisarenko G.S. (ed.))]. Available at: <https://reallib.org/reader?file=438641&pg=45> (accessed 22.05.2023).
6. Kargin V.R., Shokova E.V. *Raschet parametrov volocheniya s krucheniem kvadratnykh i pryamougol'nykh trub* [Calculation of twist drawing parameters for square and rectangular pipes] *Vestnik SGAU*, 2004, No. 1, P. 80-84. (In Russ.).
7. *Skанer mekhanicheskikh napryazheniy STRESSVISION®* [Mechanical Stress Scanner STRESSVISION®] Available at: <https://stressvision.ru/> (accessed 22.02.2023).

### Библиографические ссылки

1. Волноводный тракт. [Электронный ресурс]. URL: [http://npo-prz.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=66:2011-03-28-13-42-17](http://npo-prz.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=66:2011-03-28-13-42-17) (дата обращения: 22.02.2023).
2. Особенности производства волноводно-распределительных трактов антенно-фидерных устройств космических аппаратов / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптенок и др. // *Вестник СибГАУ*. 2013. No 6. С. 196–201.
3. Устройства и методы изготовления скрученных участков волноводов / Захаров М.А. // *Вестник НПО «Техномаш»*. 2018. No 8. С. 41-43.
4. ГОСТ 20900–2014. Межгосударственный. СТАНДАРТ. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные Технические условия. Взмен ГОСТ 20900–75; *Введ.* 2015– 09– 01. Москва: Стандартинформ, 2015. 17 с.
5. "Сопrotивление материалов" читать интересную книгу автора (Писаренко Г.С. (ред.)) [Электронный ресурс]. URL: <https://reallib.org/reader?file=438641&pg=45> (дата обращения: 22.05.2023).
6. Каргин В.Р., Шокова Е.В. Расчет параметров волочения с кручением квадратных и прямоугольных труб [Текст]/*Вестник СГАУ*. 2004. №1 -С.80-84.
7. Сканер механических напряжений STRESSVISION® [Электронный ресурс]. URL: <https://stressvision.ru/> (дата обращения: 22.02.2023).

УДК 621.9.02

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ КОНФИГУРАТОР ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

К. С. Тюрин, А. С. Причина, Л. П. Сысоева, Н. Ф. Янковская, Е. В. Раменская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: kirilltyrin1990@mail.ru

*Представленный инструментальный конфигурактор предназначен для разработки технических заданий и уточнения технических требований при проектировании концевых фрез.*

*Ключевые слова: концевая фреза, проектирование, обработка резанием, конфигурактор.*

## TOOL CONFIGURATOR FOR END MILL DESIGN

K. S. Tyurin, A. S. Prichina, L. P. Sysoeva, N. F. Yankovskaya, E. V. Ramenskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: kirilltyrin1990@mail.ru

*The presented tool configurator is designed to develop technical specifications and clarify technical requirements when designing end mills.*

*Keywords: end mill, design, cutting, configurator.*

Качество изделий ракетно-космической техники, детали которых получают механической обработкой, напрямую зависит от характеристик применяемого инструмента [1], в связи с этим постоянно возрастает потребность машиностроительных предприятий в современном инструменте с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

При выборе режущего инструмента, в качестве основного критерия используют такую характеристику, как производительность – количество срезаемого материала за единицу времени. На производительность металлорежущего инструмента оказывают влияние следующие факторы: материал режущей части; покрытие режущего инструмента; конструкция инструмента; обеспечение стружколомания; условия подачи СОЖ.

При этом совершенствования режущих инструментов достигается за счет [2, 3]: повышения производительности обработки; применения прогрессивных инструментальных материалов; оптимизации геометрических параметров режущих инструментов; увеличения длины активной части режущих кромок; эффективного использования смазочной охлаждающей жидкости (СОЖ); повышения жесткости и виброустойчивости; использования сменных многогранных пластин; использования более совершенной технологии изготовления режущих инструментов; снижения затрат на эксплуатацию режущих инструментов.

Создание оптимальной конструкции режущего инструмента для конкретных условий эксплуатации закладывается на начальном этапе его проектирования с разработки технического задания, когда определяются конструктивные размеры и технические требования проектируемого инструмента.

Для упрощения разработки технического задания на изготовления специального режущего инструмента и исключения ошибок в конструкторской документации предлагается использовать разработанный инструментальный конфигурактор, представленный на рис. 1.

Конфигуратор состоит из: основного модуля, включающего вид инструмента, тип обработки, маркировку инструмента; модуля конструктивных размеров режущего инструмента; модулей

геометрической, технологической и параметрической точности. Конструктивные размеры при разработке не стандартного режущего инструмента должны назначаться с учетом ГОСТ 32831-2014. Параметры модулей геометрической точности и технологических требований определяются по ГОСТ 17024-2015.

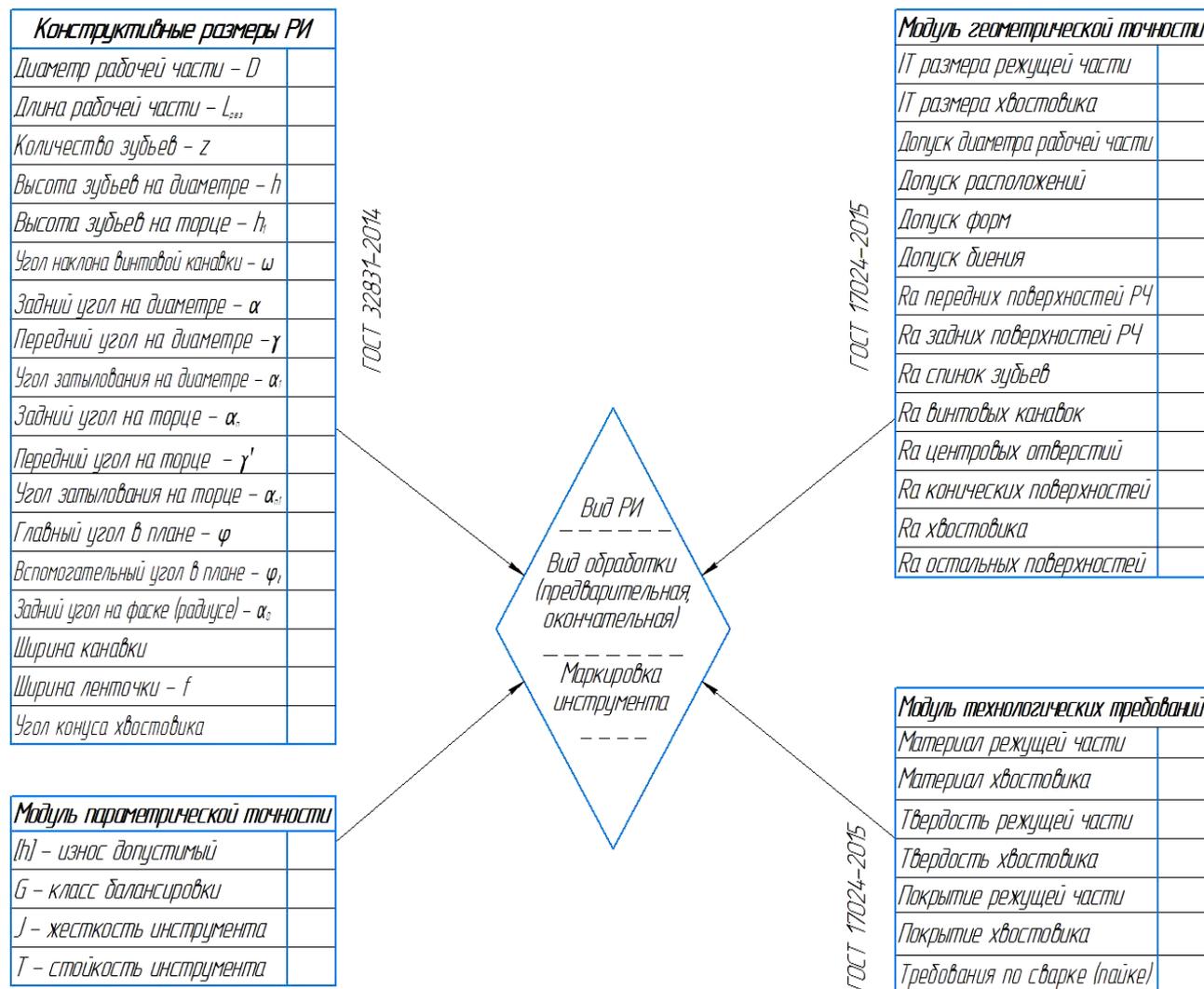


Рис. 1. Инструментальный конфигуратор для изготовления концевых фрез

Переменные модуля параметрической точности влияют на производительность инструмента и качество получаемых поверхностей. Износ инструмента во многом зависит от режимов механической обработки – скорости, глубины резания и подачи инструмента. Износ по задней поверхности – как наиболее предпочтительный вид износа для прогнозирования стойкости инструмента – достигается регулированием скорости резания и/или подачей инструмента. Допустимый остаточный дисбаланс инструмента [4] определяется с учетом класса точности балансировки в соответствии с ГОСТ ИСО 1940-1-2007.

При высокоскоростной обработке необходимо балансировать инструмент с оправкой, причем балансировку необходимо выполнять при каждой замене инструмента. Стойкость инструмента является его способностью сохранять служебное назначение при работе до переточки. Период стойкости режущего инструмента зависит от его типа, свойств обрабатываемого и инструментального материала, режимов резания, конструкции и геометрических параметров инструмента [5]. Жесткость инструмента зависит от силы резания, длины режущей части и диаметра фрезы.

Таким образом разработанный инструментальный конфигурактор предназначен для уточнения технического задания и сокращения временных затрат при проектировании специальных концевых фрез.

### Библиографические ссылки

1. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Металлорежущие инструменты. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 392 с.
2. Юликов М. И., Горбунов Б. И., Колесов Н. В. Проектирование и производство режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1987. 296 с.
3. Зубарев Ю. М. Современные инструментальные материалы. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 304 с. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/210758> (дата обращения: 02.09.2023).
4. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / ред. А. М. Дальский [и др.]. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2003. Т. 1. 912 с.
5. Сибирь инжиниринг [Электронный ресурс] URL: <http://sibengine.com/balansirovka-instrumenta/> (дата обращения: 02.09.2023).

### References

1. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. *Metallorzhushchie instrumenty* [Metal cutting tools]. Tomsk, Tomsk Un-t Publ., 2003, 392 p.
2. Yulikov M. I., Gorbunov B. I., Kolesov N. V. *Proektirovanie i proizvodstvo rezhushchego instrumenta* [Design and production of cutting tools]. M.: Mashinostroenie, 1987, 296 p.
3. Zubarev, Yu. M. *Sovremennye instrumentalnye materialy* [Modern instrumental materials]. Sankt-Peterburg : Lan. 2022. 304 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/210758> (accessed: 02.09.2023).
4. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of a machine-building technologist] / A. M. Dalskii [and others]. M: Mashinostroenie. 2003. Vol. 1. 912 p.
5. Sibir inzhiniring. Available at: <http://sibengine.com/balansirovka-instrumenta/> (accessed: 02.09.2023).

© Тюрин К. С., Причина А. С., Сысоева Л. П., Янковская Н. Ф., Раменская Е. В., 2023

УДК 621.74.06

## РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВИБРО-ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

А. Р. Хафизов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: khaf\_a03@mail.ru

*В работе спроектирована и изготовлена вибро-вакуумная установка, которая отличается от готовых покупных аналогов большим функционалом и низкой стоимостью.*

*Ключевые слова: вакуумная установка, вибростол, дегазация формомассы.*

## DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF VIBRO-VACUUM INSTALLATION

A. R. Hafizov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: khaf\_a03@mail.ru

*A vibro-vacuum installation has been designed and manufactured in the work, which differs from ready-made purchased analogues in large functionality and low cost.*

*Keywords: vacuum installation, vibrating table, formomass degassing.*

Вибро-вакуумные установки применяются для повышения качества художественных и технических отливок из различных благородных металлов. Для уменьшения поверхностных дефектов в виде корольков и наплывов применяется технология дегазации формовочной смеси путём вибровacuумирования. Такие установки обычно снабжены специальным стаканом для вакуумного литья металлов, именно этот способ литья считается самым распространённым, надёжным и продуктивным при тиражном литье. Эта установка также может применяться для дегазирования эпоксидной смолы, двухкомпонентного силикона или пластика, для стабилизации древесины, нанесения гальванических покрытий и каких-либо экспериментов с вакуумом. Готовые вибро-вакуумные установки, которые можно найти на рынке, имеют высокую цену (от 70 тыс. руб.). Дешёвые из них отличаются малым функционалом:

1. Они не имеют регулировку частоты колебания основания. Иногда регулировка частоты бывает полезна. Она позволяет установить частоту, при котором происходит резонанс системы, и получить максимальную амплитуду колебаний.

2. Они имеют низкую производительность насоса. Например, вибро-вакуумная установка фирмы KaYa Cast, стоимость которой составляет 75 тыс. руб. имеет производительность откачки воздуха, равную 60 литров в минуту. Низкая производительность немного сказывается на чистоту вакуума и на скорость возникновения необходимого вакуума. Производительность – очень важный параметр для вакуумного литья и для дегазации формовочной смеси в больших объёмах.

3. Они не способны поддерживать какое-либо определённое низкое значение давления в вакуумной камере. Иногда сильный вакуум оказывает негативное воздействие на технологический процесс. Например, в сильном вакууме при дегазации формовочная смесь или какой-либо другой раствор могут разбрызгиваться по всей вакуумной камере из-за холодного кипения воды.

Цель исследования: Разработать и изготовить такую вибро-вакуумную установку, которая будет отличаться от готовых покупных аналогов большим функционалом и низкой стоимостью.

Основа установки и самая дорогостоящая часть – это вакуумный насос. В работе использовался одноступенчатый пластинчато-роторный насос Value VE135N, производительностью 100 л/мин, бла-

годаря которому в вакуумной камере создаётся давление, равное 5 кПа, почти в 20 раз меньше атмосферного давления.

Установка представляет собой столешницу, которая сделана из 10 мм текстолита. К столешнице установлены главный шланг для откачки воздуха и вибромотор. Размеры столешницы 300\*300 мм. Столешница должна обладать высокой прочностью и быть гладкой для хорошей герметизации через резину. Столешница установлена к основанию вибро-вакуумной установки с помощью длинных шпилек М6, которые кончаются гайками на кронштейнах, напечатанных на 3D принтере. Таким способом удалось прочно поставить столешницу над основанием и при этом дать ей свободу движения в горизонтальной плоскости [1].

В качестве колпака для вакуумной камеры использовался плафон от взрывозащищённого светильника Н4Б 300. Толщина стекла колпака 8-11 мм, внутренняя высота 22 см, внутренний диаметр 18 см, объём 5,5 л, вес 4,5 кг. Чтобы колпак герметично стыковался со столешницей, к нему была приклеена на эпоксидный клей вакуумная резина, толщиной 3 мм.

Немаловажную роль установки составляет вибрация. Она разжижает формовочную смесь и приводит воздух в движение. В качестве вибромотора использовался мотор R540-7516 3.6V. Он был закреплён на нижнюю плоскость столешницы креплением, напечатанным на 3D принтере, при этом ось мотора находится в вертикальном положении, чтобы колебания происходили именно в горизонтальной плоскости. Было также напечатано крепление, соединяющее эксцентрик с мотором. В качестве эксцентрика выступает винт с закреплёнными на нём гайками. Амплитуду колебаний можно подстраивать с помощью увеличения или уменьшения количества надетых на винт гаек. Мотор управляется через специальный блок управления. Он позволяет изменять напряжение, подаваемое на мотор, тем самым с помощью него можно регулировать частоту вибрации.

Вся магистраль от вакуумного насоса до столешницы представляет собой единственный канал с отводом в виде крана для впуска воздуха по окончании работы. Собрана магистраль из распространённой сантехники на 1/2" через уплотнительную PTFE ленту. Пластинчато-роторный насос боится загрязнений, если, например, внутрь попадёт формовочная смесь или вода, то будут портиться лопатки насоса. Во избежание попадания инородных веществ внутрь насоса был установлен топливный фильтр ST 330, в который был засыпан силикагель для поглощения влаги [2].

Для поддержания какого-либо определённого низкого значения давления в вакуумной камере был собран специальный блок управления. Его основа состоит из датчика давления, микроконтроллера Arduino Nano, и реле, который включает и выключает вакуумный насос. Датчик давления представляет собой датчик Холла, закреплённый на вакуумный манометр. Датчик Холла можно перемещать вдоль окружности манометра, подбирая необходимое значение давления, которое будет устанавливаться в вакуумной камере. Датчик Холла реагирует на маленький магнит, прикреплённый на конец стрелки манометра, и отправляет данные Arduino, который затем обрабатывает их и отправляет сигнал реле на включение или выключение вакуумного насоса.

Для вакуумного литья металла был собран стальной стакан, к которому подводится шланг от вакуумной магистрали. В этот стакан погружаются перфорированные опоки из нержавеющей стали, из которых через перфорацию равномерно отводится воздух со всей поверхности формы. Для изготовления стакана использовались ниппель 1/2", стальная труба диаметром 108 мм, длиной 180 мм и стальные листы толщиной 6 мм, из которых изготавливались шайбы. Все названные компоненты были сварены между собой. Сверху стакана герметично приварена толстая шайба с внутренним диаметром под самую большую опоку (80 мм). В тех случаях, когда необходимо лить металл в опоку с меньшим диаметром, на приваренную шайбу через прокладку кладётся переходная шайба с нужным внутренним диаметром. В качестве прокладок используются кольца из термостойкого силикона.

Во время вакуумного литья при запуске насоса через ранее раскалённую опоку начинает проходить воздух, с каждой секундой остужая её и повышая риск непролива всей формы жидким металлом. Чтобы минимизировать потери тепла опоки, было принято решение включать вакуумный насос сразу перед заливкой металла в опоку. Для включения насоса используется ножная педаль, так как руки во время литья заняты тиглем.

В результате проделанной работы изготовлена вибро-вакуумная установка (рис. 1 и рис. 2). Суммарная стоимость проекта равна около 18 000 рублей. Она получилась в разы дешевле покупных аналогов и имеет большой функционал. Установка была проверена на практике, расширенный функционал позволяет комфортно с ней работать и получать отличный конечный результат отливки.

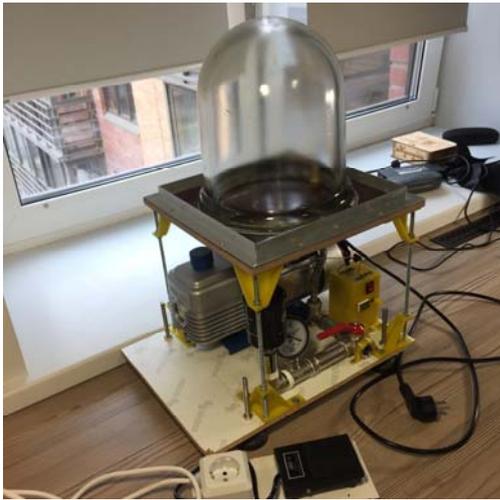


Рис. 1. Вибро-вакуумная установка



Рис. 2. Вибро-вакуумная установка

### Библиографические ссылки

1. Вакуумная установка [Электронный ресурс] // Пикабу. URL: [https://pikabu.ru/story/vakuumnaya\\_ustanovka\\_4188272](https://pikabu.ru/story/vakuumnaya_ustanovka_4188272) (дата обращения: 9.7.2023).
2. Какая температура в вакууме [Электронный ресурс] // Хабр. URL: <https://habr.com/ru/articles/648585/> (дата обращения: 15.7.2023).

### References

1. *Vakuumnaya ustanovka* [Vacuum installation]. (In Russ.). Available at: [https://pikabu.ru/story/vakuumnaya\\_ustanovka\\_4188272](https://pikabu.ru/story/vakuumnaya_ustanovka_4188272) (accessed 9.7.2023).
2. *Kakaya temperatura v vakuume* [What is the temperature in a vacuum]. (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/articles/648585/> (accessed 15.7.2023).

© Хафизов А. Р., 2023



**Секция**  
**«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ»**

УДК 532.1

**ОСНОВНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ВИХРЕВЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН**

М. М. Баяндина, А. В. Кустов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: bayandinamaria@yandex.ru

*Гидравлическое сопротивление является важной гидродинамической характеристикой контактных ступеней, которая характеризует затраты энергии газового потока на проведение процесса массообмена и обуславливает область его применения на практике.*

*Ключевые слова: ректификация, гидравлическое сопротивление, гидродинамические закономерности.*

**THE MAIN HYDRODYNAMIC DEPENDENCES FOR DETERMINING  
THE HYDRAULIC RESISTANCE OF VORTEX CONTACT DEVICES  
OF DISTILLATION COLUMNS**

M. M. Bayandina, A. V. Kustov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: bayandinamaria@yandex.ru

*Hydraulic resistance is an important hydrodynamic characteristic of the contact stages, which characterizes the energy consumption of the gas flow for the mass transfer process and determines the scope of its application in practice.*

*Keywords: rectification, hydraulic resistance, hydrodynamic patterns.*

Знание величины гидравлических потерь в аппарате необходимо также при расчете схем технологической обвязки аппарата. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе имеются многочисленные данные по исследованию закономерностей изменения гидравлического сопротивления вихревых аппаратов от режимных и конструктивных параметров, с различными типами завихрителей.

Согласно [1, 2], где исследованы массообменные аппараты с осевым завихрителем с углом наклона  $45 - 75^\circ$ , величина гидравлического сопротивления сухих аппаратов пропорциональна квадрату скорости газового потока и увеличивается с ростом угла наклона лопастей завихрителя, что обусловлено возрастанием крутки газового потока. Более подробное исследование вихревых массообменных аппаратов с осевыми завихрителями, с углом наклона лопастей завихрителя  $78, 74$  и  $60^\circ$  [3] выявило наличие двух аэродинамических режимов работы вихревого аппарата:

- при первом режиме, турбулентном (скорость газа по сечению  $< 20$  м/с), гидравлическое сопротивление пропорционально скорости газа в степени 1,75;
- при втором, автомодельном – в степени 2.

Оба режима наблюдались как для сухого, так и для орошаемого аппарата. При малых нагрузках по жидкости ( $L/G < 2$ ) сопротивление орошаемого аппарата практически совпадало с сопротивлением сухого аппарата. С увеличением расхода жидкой фазы величина гидравлического сопротивления увеличивалась пропорционально удельной нагрузке аппарата по фазам.

Наличие двух аэродинамических режимов работы вихревых аппаратов с осевыми завихрителями отмечено также в работе [4]. В отличие от работы [3], изменение величины гидравлического сопротивления в турбулентном режиме оказалось пропорциональным скорости газового потока в степени 2,87. Увеличение угла наклона лопастей завихрителя приводит к повышению степени крутки двухфазного газо-жидкостного потока и энергетических потерь в аппарате. Нарушение квадратичной зависимости гидравлического сопротивления вихревого аппарата от расхода газовой фазы может быть обусловлено как аэродинамической структурой потока в аппарате, так и внешними причинами, одной, из которых, является введение в аппарат жидкой фазы. Затраты энергии газового потока на транспорт жидкости составляют часть общих затрат энергии в аппарате. Если эта составляющая не подчиняется квадратичной зависимости, то сопротивление аппарата в целом также будет отклоняться от этой закономерности. Этот факт отражают результаты работы [5], в которой указывается, что если связь гидравлического сопротивления сухого контактного устройства со скоростью газового потока подчиняется квадратичному закону, то наблюдается авто модельность коэффициента гидравлического сопротивления аппарата по расходу газовой фазы.

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления вихревых аппаратов с тангенциальными завихрителями показывают, что гидравлические закономерности в этих аппаратах аналогичны закономерностям в аппарате с осевыми завихрителями. Так коэффициенты гидравлического сопротивления сухих аппаратов авто модельны по расходу газовой фазы. Величина гидравлических потерь на ступени возрастает с увеличением крутки газового потока.

Вместе с тем, закономерности изменения гидравлического сопротивления вихревого орошаемого аппарата с тангенциальным завихрителем отличаются одной характерной особенностью, которая не наблюдается, в аппаратах с другим типами завихрителей. Это связано со снижением величины гидравлического сопротивления орошаемого аппарата ниже величины сопротивления сухого аппарата, при малых нагрузках по жидкой фазе. Результаты обзора показывают, что величина этого снижения довольно существенна и может достигать 50 % величины сопротивления сухого аппарата.

Данные по сопротивлению вихревых аппаратов с тангенциальными завихрителями показывают, что гидравлические потери сухого аппарата подчиняются квадратичной зависимости от скорости газового потока и увеличиваются с уменьшением коэффициента крутки завихрителя, а коэффициенты гидравлического сопротивления орошаемых аппаратов не авто модельны по расходу газовой фазы и полностью определяются соотношением нагрузок по фазам. Особенность зависимости коэффициента сопротивления аппарата от удельной нагрузки по жидкой фазе состоит в том, что при малых значениях нагрузки коэффициент сопротивления вихревого аппарата сначала резко убывает и становится меньше коэффициента сопротивления сухого аппарата, а затем, с увеличением нагрузки, возрастает, асимптотически приближаясь к прямой. Очевидно, что объяснение эффекту снижения гидравлических потерь следует искать во взаимодействии газового потока с дисперсной фазой в рабочем объеме аппарата. При взаимопроникающем движении газа через вращающийся газо-жидкостный слой происходит перераспределение энергии, идущей на создание крутки потока, в энергию, затрачиваемую на вращение слоя. В результате крутка газового потока падает. При малых удельных нагрузках аппарата по жидкости, затраты энергии на транспорт жидкой фазы вдоль оси аппарата незначительны и общее сопротивление орошаемого аппарата, обусловленное падением крутки газового потока, уменьшается и становится меньше сопротивления сухого аппарата. С увеличением нагрузки аппарата по жидкой фазе, перераспределение энергии газового потока в энергию вращательного движения капельного слоя уменьшается, раскрутка газового потока замедляется, и возрастание расхода энергии на транспорт дисперсной фазы вдоль оси аппарата оказывается превалирующим, что приводит к увеличению общего сопротивления вихревого аппарата.

Различие в функциональном назначении исследованных вихревых аппаратов, в их конструктивных параметрах и режимных условиях, определило разнообразие полученных результатов по гидравлическому сопротивлению и – методов их обобщения и представления.

### Библиографические ссылки

1. Вязовкин, Е.С. Исследование гидродинамики и эффективности вихревых контактных ступеней : дис... канд.техн.наук. КХТИ, 1972. 182 с
2. Марголин, Е.В. Выбор оптимальных параметров вертикального каплеуловителя М.: ЦИНТИ-химнефтемаш. 1976. №3. с. 11-13.

3. Мусташкин, Ф.А. Гидродинамические закономерности в массообменном аппарате вихревого типа. В кн.: Труды Казан. хим.-технол. ин-та. Вып. 45. 1970. с.26-31.
4. Левданский, Э.И. Исследование скоростной ректификации в аппаратах с прямоточно-центробежными контактными устройствами. В кн.: 3-я Всес. конф. по теории и практике ректификации. Часть 2. Северодонецк. 1973. с. 258-261.
5. Платонов, В.М. Разделение многокомпонентных смесей. М.: Наука. 1965. 368 с.

#### References

1. Vyazovkin, E.S. Issledovanie gidrodinamiki i effektivnosti vikhrevykh kontaknykh stupenei [Investigation of hydrodynamics and efficiency of vortex contact stages]: dis... kand.tekhn.nauk. KKhTI, 1972. 182 s
2. Margolin, E.V. Vybor optimal'nykh parametrov vertikal'nogo kapleulovitelya [Selection of optimal parameters of the vertical drop catcher] М.: TsINTIkhimneftemash. 1976. №3. s. 11-13.
3. Mustashkin, F.A. Gidrodinamicheskie zakonomernosti v massoobmennom apparate vikhrevogo tipa [Hydrodynamic regularities in a vortex-type mass transfer apparatus.]. V kn.: Trudy Kazan. khim.-tekhnol. in-ta. Вып. 45. 1970. s.26-31.
4. Levdanskii, E.I. Issledovanie skorostnoi rektifikatsii v apparatakh s pryamotochno-tsentrobezhnymi kontaktnymi ustroystvami [Investigation of high-speed rectification in devices with direct-flow centrifugal contact devices]. V kn.: 3-ya Vses. konf. po teorii i praktike rektifikatsii. Chast' 2. Severodonetsk. 1973. s. 258-261.
5. Platonov, V.M. Razdelenie mnogokomponentnykh smesei [Separation of multicomponent mixtures]. М.: Nauka. 1965. 368 s.

© Баяндина М. М., Кустов А. В., 2023

УДК 629.78

## ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ НАВЕДЕНИЯ СПУТНИКА

А. Р. Галиев, П. А. Есина, В. М. Корнев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: albert-galiev-2001@mail.ru

*В данной статье описаны основные особенности и проблемы, возникающие при ориентации и наведении спутника, а также возможные внешние воздействия, которые могут нарушить наведение спутника.*

*Ключевые слова: Анализ, наведение, спутник, проблема.*

## THE MAIN PROBLEMS ARISING IN THE PROCESS OF SATELLITE GUIDANCE

A. R. Galiev, P. A. Esina, V. M. Kornev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: albert-galiev-2001@mail.ru

*This article describes the main features and problems that arise during the orientation and pointing of a satellite, as well as possible external influences that can affect the pointing of a satellite.*

*Keywords: Analysis, guidance, satellite, problem.*

Наведение спутников – это важнейший этап в космической миссии, который позволяет достичь требуемой орбиты и точности позиционирования. Однако этот процесс сопряжен с рядом проблем и сложностей, которые требуют серьезного анализа и поиска соответствующих решений. Анализ основных проблем, сложностей и особенностей, возникающих в процессе наведения спутника, является важным аспектом для эффективной работы космических систем. Одной из основных проблем является точность наведения спутника на целевую орбиту. Для этого требуется учитывать множество факторов, таких как гравитационное воздействие Земли, солнечная радиация, атмосферное сопротивление и другие внешние воздействия. Все эти факторы могут привести к отклонениям от заданной орбиты, что требует постоянного корректирования и управления двигателями. Кроме того, необходимо учесть и собственные характеристики спутника, такие как его масса, размеры, форма и т. д. Второй важной проблемой является необходимость постоянного обновления данных о положении спутника и его ориентации. Для этого используются специальные системы навигации и сенсоры, которые позволяют определить точное положение спутника в пространстве. Однако, данные сенсоры могут быть подвержены ошибкам, поэтому требуется постоянный мониторинг и корректировка положения спутника. Кроме того, требуется разработка и использование специальных систем наведения, таких как гироскопы, акселерометры и звездные датчики, которые позволяют определить положение и ориентацию спутника в космосе. Третьей проблемой является необходимость управления двигателями спутника для его наведения на нужную орбиту. Управление двигателями требует точного расчета времени и силы зажигания, чтобы достичь нужной скорости и ориентации. Кроме того, необходимо учесть и возможные ограничения на использование топлива и ресурсов спутника [1].

Еще одной проблемой является необходимость учета изменений состава груза и его распределения внутри спутника. Это может повлиять на центр масс и инерцию спутника, что в свою очередь требует корректировки параметров наведения. Кроме того, спутники могут быть подвержены внешним воздействиям, таким как солнечное излучение и микрометеориты, которые могут изменить их ориентацию и требуют дополнительной корректировки [2].

Корректировка и изменение ориентации спутника после воздействия внешних источников осуществляется с помощью системы контроля и управления ориентацией (Attitude Control System, ACS). ACS состоит из нескольких компонентов, включая гироскопы, акселерометры, магнитометры и солнечные датчики. Гироскопы измеряют скорость вращения спутника вокруг его осей, акселерометры измеряют ускорение, магнитометры определяют магнитное поле Земли, а солнечные датчики измеряют интенсивность света от Солнца. После воздействия внешних источников, таких как солнечный

ветер, гравитационное притяжение, аэродинамическое сопротивление, микрометеориты и другие, ACS получает данные от этих компонентов и вычисляет необходимые коррекции для восстановления желаемой ориентации спутника. Для корректировки ориентации спутника используются различные методы, включая исправление ориентации с помощью реакционных колес, использование магнито-развязки, управление с помощью реактивного двигателя и другие методы. Все эти процессы контролируются и управляются с помощью программного обеспечения, которое обрабатывает данные от компонентов ACS и выдаёт соответствующие команды для корректировки ориентации спутника [3].

Сложность наведения спутников также связана с необходимостью обеспечения надежности и безопасности процесса. В случае сбоя или отказа системы наведения, спутник может потерять контроль и стать непригодным для выполнения своих задач. Поэтому необходимо применять надежные системы резервирования и автоматического восстановления, которые могут предотвратить потерю спутника и обеспечить его дальнейшую эксплуатацию.

В качестве систем резервирования и автоматического восстановления в спутниках могут использоваться различные методы и компоненты ориентации. Некоторые из них включают такие важные компоненты, гироскопы, акселерометры, магнитометры и другие, могут быть дублированы для обеспечения резервного экземпляра в случае отказа основного компонента.

Спутники могут быть оборудованы автономными системами управления, которые могут принимать решения и выполнять коррекции ориентации без необходимости вмешательства операторов на земле. Эти системы могут быть программно настроены на выполнение определенных действий при обнаружении отказа или неправильной работы компонентов ориентации спутника. Для обеспечения непрерывного питания спутников могут использоваться резервные источники энергии, такие как батареи или солнечные батареи. Это позволяет спутнику продолжать работу и выполнять коррекции ориентации даже при временных сбоях в основном источнике энергии. Если спутник выходит из заданной ориентации, системы автоматического восстановления могут быть активированы для выполнения коррекций и возвращения спутника в желаемую ориентацию, используя реакционные колеса, реактивные двигатели или другие методы коррекции ориентации [4].

В целом, анализ основных проблем и сложностей, возникающих в процессе наведения спутников, требует учета множества факторов, таких как точность наведения, изменение состава груза, целевая точка наведения и надежность системы. Только с учетом всех этих аспектов можно разработать эффективные и надежные методы наведения спутников, которые позволят достичь поставленных целей в космической миссии.

### Библиографические ссылки

1. Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013avanesov.pdf> (дата обращения: 26.08.2023).
2. Каргин А.В., Красильников А.А., Михалев Д.А. Проблемы наведения спутника на цель. Вестник Московского университета. Серия 10: Радиофизика и лазерная техника. 2012; 4: 65-71.
3. Лебедев В.Ф., Попов В.С. Основные проблемы наведения и стабилизации спутниковых систем. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005; 3: 26-31.
4. Николаев Д.А., Степанов А.В., Шеремет А.Л. Проблемы наведения и стабилизации спутникового комплекса на геостационарной орбите. Труды Международной научно-технической конференции "Современные информационные технологии и IT-образование". 2018; 4: 145-150.

### References

1. Modern problems of orientation and navigation of spacecraft. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013avanesov.pdf> (accessed: 26.8.2023).
2. Kargin A.V., Krasilnikov A.A., Mikhalev D.A. Problemy navedeniia sputnika na tsel. Vestnik Moskovskogo universiteta. Serii 10: Radiofizika i lazernaia tekhnika. [Problems of satellite guidance to the target. Vestnik of Moscow University. Series 10: Radiophysics and laser technology]. 2012; 4: 65-71.
3. Lebedev V.F., Popov V.S. Osnovnye problemy navedeniia i stabilizatsii sputnikovykh sistem. Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy. [Main problems of guidance and stabilization of satellite systems. Information-measuring and control systems]. 2005; 3: 26-31.
4. Nikolaev D.A., Stepanov A.V., Sheremet A.L. Problemy navedeniia i stabilizatsii sputnikovogo kompleksa na geostatsionarnoi orbite. Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie" [Problems of guidance and stabilization of satellite complex on geostationary orbit. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern information technologies and IT-education"]. 2018; 4: 145-150.

© Галиев А. Р., Есина П. А., Корнев В. М., 2023

УДК 629.7.021

## УСТРОЙСТВА ГРАВИТАЦИОННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В КОНСТРУКЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

П. А. Есина, А. Р. Галиев, В. М. Корнев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: polina\_alex13@mail.ru

*В работе рассматриваются варианты устройств гравитационной стабилизации, применимые в конструкции малого космического аппарата.*

*Ключевые слова: малый космический аппарат, гравитационная система ориентации, гравитационная штанга, актуатор.*

## GRAVITATIONAL STABILIZATION DEVICES IN THE DESIGN OF A SMALL SPACECRAFT

P. A. Esina, A. R. Galiev, V. M. Kornev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: polina\_alex13@mail.ru

*The paper considers variants of gravitational stabilization devices applicable in the design of a small spacecraft.*

*Key words: small spacecraft, gravity orientation system, gravity rod, actuator.*

В настоящее время ряд ведущих стран мировых космических держав проводят исследования и проектные разработки для создания малых космических аппаратов (МКА). Уменьшение габаритов и массы является большим преимуществом в области космического приборостроения, поскольку это влечет за собой существенное снижение финансовых затрат на проектирование и вывод космического аппарата на орбиту.

Одной из самых главных задач, решение которой необходимо находить почти что в течение всего применения в космическом пространстве искусственных спутников, является обеспечение заданного углового движения, то есть создание необходимой ориентации и стабилизации МКА. Космическому аппарату задается определенное угловое движение относительно заданных ориентиров поворотом вокруг центра масс. В качестве ориентиров используют видимые небесные и наземные объекты (звёзды, Солнце, линия горизонта) или направления в пространстве (местная вертикаль, вектор напряжённости геомагнитного поля, вектор скорости набегающего потока воздуха), которые возможно измерить приборами.

К устройствам систем ориентации и стабилизации малых космических аппаратов предъявляются определенные требования, вызванные основными ограничениями по массе, размерами аппарата, его энергетическим и вычислительным ресурсам. Процесс ориентации по заданному направлению КА основывается на изменении из положения неориентированного в ориентирование. В задачу стабилизации входит восстановление первоначального положения, которое было нарушено вследствие воздействия каких-либо возмущающих факторов [1].

Нами предлагается проект малого космического аппарата CubeSat размера 3U с гравитационной системой ориентации (рис. 1). Гравитационное устройство показана условно. Конструкция такого спутника требует устройство гравитационной стабилизации, необходимое для развёртывания МКА после отделения его от ракеты-носителя, а также для создания восстанавливающего момента.



Рис. 1. Внешний вид МКА

Рассматривалось два варианта устройства гравитационной системы ориентации. Первым и чаще всего используемым вариантом является применение гравитационной телескопической штанги (ГШ) (рис. 2, а). Такое устройство имеет форму стержня, распределяющего части спутника друг от друга на определенное расстояние. Из-за того, что сила притяжения каждой части спутника зависит от расстояния до центра Земли, создается момент, стремящийся выставить штангу вдоль прямой направленной на центр Земли (местная вертикаль). Принцип работы гравитационной системы ориентации заключается в следующем. Изначально ГШ находится в собранном виде за счет натяжения проволоки на катушке. При выводе космического аппарата на орбиту стабилизирующий двигатель вместе с катушкой приводятся в движения. За счет удлинения проволоки, которая была намотана на катушку, ГШ выдвигается в рабочее положение, в результате чего усиливается взаимодействие постоянного магнита в ГШ с магнитным полем Земли, создавая тем самым необходимый по величине управляющий момент. Таким образом, ГШ ориентирует спутник на центр Земли. Действие гравитационного момента можно уменьшить. Для этого необходимо двигатель вращать в другую сторону. При этом длина штанги уменьшится, следовательно, и уменьшится действие гравитационного момента [2].

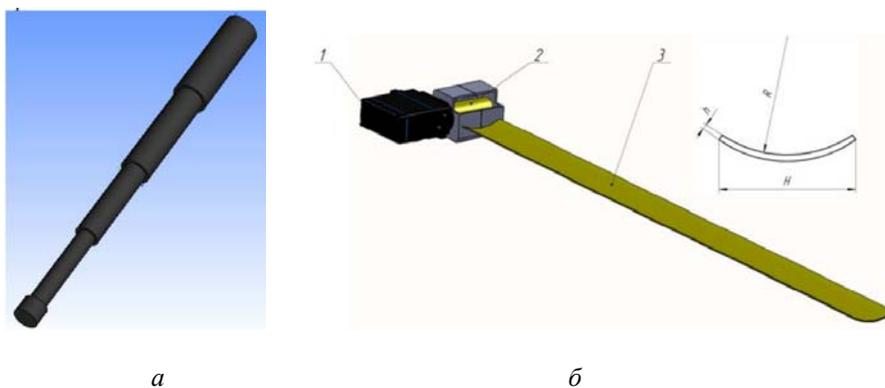


Рис. 2. Устройства гравитационной стабилизации.  
 а) гравитационная телескопическая штанга;  
 б) актуатор на основе желобчатой ленты.

Вторым вариантом выступает актуатор на основе желобчатой ленты (рис. 2, б). За счет формы сечения лента обладает достаточной гибкостью для наматывания на барабан и имеет необходимый запас устойчивости в развернутом состоянии. Данная конструкция состоит из трех лент, две из которых являются вспомогательными и меньшими по диаметру, чтобы предотвратить деформацию штанги от неравномерного теплового нагрева солнечными лучами [3].

Актуатор на основе желобчатой ленты, установленной на спутнике для гравитационной ориентации, работает на основе принципа использования гравитационных сил для управления ориентацией спутника. Принцип работы актуатора заключается в следующем. Под действием гравитационной силы, различная масса желобчатой ленты создает неравномерное распределение гравитационного мо-

мента вокруг оси вращения спутника. Этот неравномерный гравитационный момент вызывает вращение спутника до тех пор, пока гравитационные силы не станут сбалансированными. Таким образом, актуатор на основе желобчатой ленты использует гравитационные силы для управления ориентацией спутника и обеспечивает его стабильную и точную ориентацию в пространстве.

Гравитационная штанга и актуатор на основе желобчатой ленты имеют свои преимущества и недостатки, и выбор между ними зависит от конкретных требований и условий применения. Вот несколько факторов, которые можно учесть при сравнении этих двух актуаторов.

Простота конструкции. Гравитационная штанга обычно более проста в исполнении и имеет меньше подвижных частей, что может облегчить ее производство и обслуживание. Актуатор на основе желобчатой ленты может быть более сложным в конструкции и требовать более точной калибровки.

Гибкость и точность. Актуатор на основе желобчатой ленты позволяет достичь более точной и гибкой регулировки ориентации спутника, так как массы на разных участках ленты могут быть изменены в широком диапазоне. Гравитационная штанга может иметь ограниченные возможности по точной настройке.

Эффективность. Гравитационная штанга может потреблять меньше энергии МКА для своей работы, так как её работа основана на использовании гравитационных сил. Актуатор на основе желобчатой ленты может потреблять больше энергии МКА из-за необходимости движения ленты и изменения массы на разных участках.

Надежность. Оба актуатора могут быть достаточно надежными, но гравитационная штанга может иметь меньше подвижных частей и, следовательно, быть менее подвержена поломкам или износу.

В целом, выбор между гравитационной штангой и актуатором на основе желобчатой ленты зависит от конкретных требований и условий применения, таких как требуемая точность, гибкость регулировки, энергопотребление и надежность.

### Библиографические ссылки

1. Сарычев В.А. Д.Е. Охотимский и его роль в создании систем пассивной ориентации спутников // Прикладная небесная механика и управление движением. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2010. 368 с.
2. Малые мира сего [Электронный ресурс]. URL: <https://old.computerra.ru/2007/683/3158/> (дата обращения: 27.08.2023).
3. Климовский Д.А. Конструкция гравитационной системы стабилизации. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: тезисы X Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи (8–12 апреля 2014 г., Красноярск): в 2 т. Т. 1. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 87–88

### References

1. Sarychev V.A. [D.E. Okhotsimsky and his role in the creation of passive satellite orientation systems]. Moscow, *IPM named after M. V. Keldysh.*, 2010, 368 p.
2. Small of this world. Available at: <http://www.fmi.uni-sofia.bg/fmi/statist/education/textbook/eng/glosa.html> (accessed 27.08.2023).
3. Klimovsky D.A. [The design of the gravitational stabilization system.]. Tezisy X Vserocc. nauch. prakt. konf. "Actual problems of aviation and cosmonautics" [Materials X all-Russian. Practical/ Scientific. Conf "Actual problems of aviation and cosmonautics"]. Krasnoyarsk, 2014, p. 87–88.

© Есина П. А., Галиев А. Р., Корнев В. М., 2023

УДК 66.015.23

## ВЛИЯНИЯ СИЛ ИНЕРЦИИ НА ДИАМЕТР ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ РЕКТИФИКАЦИИ

А. В. Кустов, М. М. Баяндина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: alexkust@rambler.ru

*В данной статье рассмотрен вопрос определения диаметра парового пузыря, образующегося на ступенях вихревой дистилляции. Известная формула определения диаметра пузырьков учитывает влияние сил инерции, возникающих в результате работы ректификационной колонны при вращении газо-жидкостного слоя на контактной ступени.*

*Ключевые слова: ректификация, газосодержание, удельная межфазная поверхность.*

## THE INFLUENCE OF INERTIA FORCES ON THE DIAMETER OF THE VAPOR BUBBLE DURING RECTIFICATION

A. V. Kustov, M. M. Bayandina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: alexkust@rambler.ru

*This article is deals with the question of determining the diameter of the steam bubble formed on Vortex distillation stages. The famous formula is determining the diameter of bubbles taken into account influence of inertial forces generated by the work of rectifying column by spinning the gas-liquid contact layer on the stage.*

*Key words: rectifying, gas content, specific surface.*

Анализ путей интенсификации массо- теплопередачи в системе газ-жидкость показывает, что использование для проведения этих процессов конструкций барботажных аппаратов не обеспечивает существенного повышения производительности и эффективности. В связи с этим, применение центробежного ускорения является наиболее простым способом интенсификации массообмена. Вращение потока способствует дроблению пузырьков пара на ступени и предотвращает капельный унос, за счет действия инерции. В зависимости от нагрузки по пару (газу), на контактных ступенях наблюдается определенный гидродинамический режим течения газа и жидкости. Визуальное наблюдение за перемещением струй газа, выходящих из каналов осевых и тангенциальных завихрителей, показывает их некоторое различие в траектории движения. Для осевых завихрителей струя газа при выходе из каналов устремляется в верх, а в тангенциальных – к периферии аппарата. Поэтому при малых расходах газа, когда сила инерции незначительна, на ступени с осевыми завихрителями наблюдается брызгоунос. Кроме того, с целью обеспечения газосодержания по всему объему жидкости на ступени ширина каналов для прохода газа в осевых завихрителях должна быть выполнена равной толщине вращающегося газо-жидкостного слоя.

Поэтому для определения диаметра пузыря был использован известный процесс диспергирования, который рассматривают также с позиций гидродинамической неустойчивости, исходя из которой получено [1, 2]

$$d_n = 3,48 \cdot \left( \frac{\sigma^3}{c_T^3 \cdot \rho^3 \cdot \varepsilon_0^2} \right)^{1/5}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диссипация энергии в единице массы сплошной среды, Вт/кг;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $c_T$  – коэффициент сопротивления.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений диаметра газового пузыря представлено на рисунке 1. Сплошная линия на рисунке – значение диаметра пузыря с учетом мощности, создаваемой силой инерции.

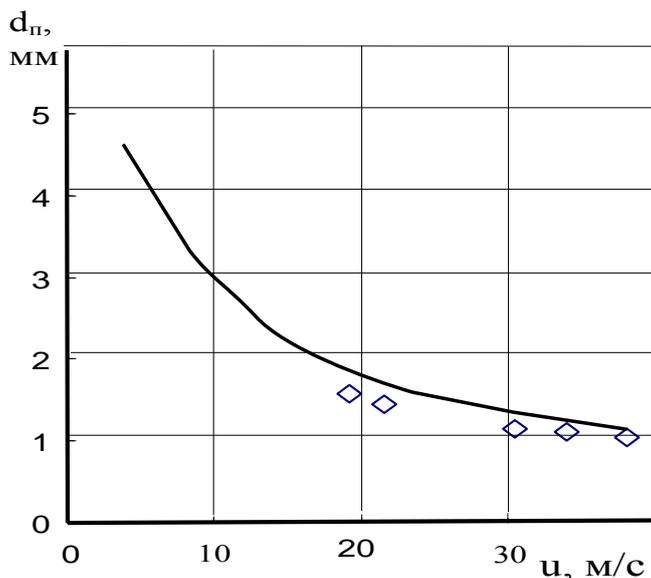


Рисунок 1 – Зависимость среднеповерхностного диаметра пузыря от скорости газа в каналах тангенциального завихрителя. Экспериментальные точки:  $D = 330$  мм,  $\delta_0 = 15$  мм,  $l = 15$  мм.  $n = 8$  шт,  $V = 2$  л. Сплошная линия – расчет по уравнению (1)

Расчетные значения диаметра пузырьков газа, проведенные по изложенной методике, имеют большую величину (рисунок 1, пунктирная линия) в сравнении с опытными. Это позволяет предположить, что дробление пузырьков газа на ступени обеспечивается не только силами внутреннего трения между вращающимися газо-жидкостными слоями, но и за счет давления, вызванного силами инерции [3, 4]. Мощность, создаваемая силами инерции, равна:

$$N = m \cdot \omega^3 \cdot R^2, \quad (2)$$

где  $m$  – масса жидкости на контактной ступени, кг;  $R$  – радиус завихрителя, м;  $\omega$  – угловая скорость газо-жидкостного слоя,  $\text{с}^{-1}$ .

Как видно, учет мощности, создаваемой силой инерции позволяет приблизить расчетные значения диаметра пузыря к экспериментальным. Полученная зависимость для определения диаметра парового пузыря, предложенная в данной статье, позволяет приблизить расчетные значения к экспериментальным. Это, в свою очередь, дает возможность более точно подходить к расчету ректификационных колонн, применяемых при получении и очистки этанола, получаемого на основе гидролизата растительного сырья. Расчетные значения диаметра пузырьков газа, проведенные по изложенной методике, имеют большую величину в сравнении с опытными. Это позволяет предположить, что дробление пузырьков газа на ступени обеспечивается не только силами внутреннего трения между вращающимися газо-жидкостными слоями, но и за счет давления, вызванного силами инерции. Дробление пузырьков начинается при скорости их движения более 0,1 м/с, сжимаемостью газо-жидкостного слоя можно пренебрегать до скорости порядка 7 м/с, что сопоставимо с условиями поставленных экспериментов.

#### Библиографический ссылки

1. Войнов Н. А., Кустов А. В., Николаев Н. А. Получение безводного этанола при ректификации под вакуумом // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – № 3-4 – с. 373-378
2. Войнов Н. А., Николаев Н. А., Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен в вихревой ректификационной колонне // Химическая промышленность. – 2008. – т.85. – № 8. – с.413-419.

3. Кустов А.В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья. Автореферат дис... канд.техн.наук; 05.21.03/А.В. Кустов. Красноярск: СибГТУ. – 2010.

4. Voinov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A.V. Hydrodynamics and mass exchange in vortex rectifying column [text] // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2009. – т. 82. – № 4. – с. 730-735.

### References

1. Voinov N. A. Kustov A. V., Nikolaev N. A. Poluchenie bezvodnogo etanola pri rektifikacii pod vakuumom [Preparation of anhydrous ethanol under vacuum distillation] // Hvoinye borealnoy zony. – 2012. – № 3-4 – pp. 373-378

2. Voinov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A. V. Gidrodinamika I massoobmen v vihrevoy rektifikacionnoy kollone [Hydrodynamics and mass transfer in a vortex distillation column] // – Chemical industry. – 2008. – Т.85. – № 8. – pp.413-419.

3. Kustov A. V. Gidrodinamika I massoobmen na vihrevuh rektifikacionnyh ctupenyah pri pererabotke rastitelnogo surya [Hydrodynamics and mass transfer in the vortex of distillation steps in the processing of vegetable raw materials] Abstract of thesis of Candidate of Science; 05.21.03. Krasnoyarsk: SibGTU. – 2010. – 22 pp.

4. Voinov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A.V. Hydrodynamics and mass exchange in vortex rectifying column [text] // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2009. – т. 82. – № 4. – с. 730-735.

© Кустов А. В., Баяндина М. М., 2023

УДК 621.8

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ВАЛОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ САПР

В. Г. Межов<sup>1</sup>, Д. Ю. Брангин<sup>1</sup>, А. С. Приходько<sup>1</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: viktor-mezhov@yandex.ru

*Описана методика проектного расчета валов помощью элементов САПР созданных на кафедре основ конструирования машин*

*Ключевые слова: конструирование валов, проектный расчет, привод.*

## DESIGNING SHAFTS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT WITH CAD ELEMENTS.

V. G. Mezhov<sup>1</sup>, D. Y. Brangin<sup>1</sup>, A. S. Prikhodko<sup>1</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: viktor-mezhov@yandex.ru

*The methodology of the design calculation of the shafts with the help of CAD elements created at the department of the basics of designing machines is described.*

*Key words: shaft design, design calculation, drive.*

Проектирование оборудования – сложный творческий процесс создания деталей и узлов, при котором на первом этапе расчетов приходится, упрощая и утрируя режимы и условия нагрузок, с явными допущениями проводят предварительные расчеты [1].

При проектировании привода электромеханического типа процесс изготовления вала включает в себя два этапа: разработку конструкции привода и определение диаметра участков привода предварительного, ориентировочного расчета и проверку уточненного расчета

Проектный расчет валов проводится по заниженным допускаемым напряжениям на чистое кручение, не смотря на наличие изгиба [2]. По этому критерию приближенно определяются основные диаметры участков вала.



Рис. 1 – Ввод данных на чистое кручение

Проверка валов проводится на показатели статической прочности и усталости [2]. В этом случае составляются расчетные схемы вала, а также схемы действующих на нее сил.

Эта научная работа позволяет провести ориентировочные расчеты валов и дополняет уже существующий комплекс проектных программ на кафедре основ конструирования машин.

Методики для оценки разных условий рабочего состояния ступенчатых валов разработаны на основе схемы расчета, где схематизируются действующие нагрузки, формы ступенчатых валов и характеристики материалов.

Впрочем, схема расчета в некоторых случаях не отражает реальной картины рабочего состояния валового аппарата.

Для устранения этого недостатка и представления расчетного плана в более реальном состоянии необходимо вначале создать реальные модели ступенчатого вала, а только потом на его основе переходить к расчетному шаблону и уже оценить все факторы рабочего состояния.

Для того, чтобы создать реальную модель ступенчатого вала, необходимо:

- определить необходимое требование условий эксплуатации количество ступеней; – решить проблему с закреплением деталей на ступенях вала; – обеспечить удобство монтажа и демонтажа узла вала; – подобрать приемлемые размеры диаметров и длины ступеней [3].

Для выполнения этих задач были разработаны методика и программа эскизного проектирования ступенчатых валов.

Предварительный выбор диаметров ступеней вала осуществляется с учетом следующих требований:

а равнопрочность ступеней валов.

б удобство установки деталей на валу.

в концевую ступень обычно сравнивают с диаметром соединяемых деталей.

При этом диаметр вала определяют только по известному на данный момент крутящему моменту [4].

При выборе длин ступеней, которые в основном зависят от введенных параметров, ширины и расположения деталей, возникает ряд сложных ситуаций связанных с размерами и выбором подшипников, уплотнений и конструированием корпуса и крышек подшипников.

Конструирование вала осуществляется тремя этапами:

1 выбор схемы и места установки вала;

2 ввод известных параметров;

3 этап: проектирование вала [5].

Тип вала	Количество монтируемых деталей	Конструктивная схема	Номер схемы, n
Промежуточный вал	4		9
	5		8
	4		3
	4		10

Рис. 2- Выбор схемы и места установки вала

Расчетные диаметры и длины должны быть откорректированы в оптимальном направлении, согласовывая их значение со стандартными параметрами для соответствующей детали. Чтобы удобно пользоваться, предлагается порядок для изменения соответствующего параметра ступени.

Преимуществами этой программы можно считать то, что позволяет управлять реальными величинами крутящего момента на валах, диаметрами участков валов, позволяет предварительно построить редуктор, определить месторасположение деталей, подшипников на валах, что позволяет понять конструкцию реально существующих агрегатов и узлов, которыми они столкнутся на производстве.

### Библиографические ссылки

1. Дунаев, Петр Федорович. Детали машин. Курсовое проектирование : [учеб. пособие для машиностроит. специальностей сред. проф. образования]. – М.: Машиностроение, 2007. – 560 с 90 экз.
2. Курмаз, Леонид Владимирович. Конструирование узлов и деталей машин : [справ. учеб.-метод. пособие для вузов]. – М.: Высш. шк., 2007. – 455 с. 51 экз.
3. Леликов, Олег Павлович. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин [Электронный ресурс] : [конспект лекций по курсу "Детали машин" для техн. специальностей вузов] / О. П. Леликов, 2007. – 464 с. ЭБС "Лань". Ссылка на текст учебника: [https://e.lanbook.com/book/745#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/745#book_name).
4. Межов В. Г., Чумаков В. Ф. Метод оценки надежности динамических параметров при проектировании механических систем / Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. СибГТУ. Красноярск, 2012. с. 25-26.
5. Остяков Ю. А. Проектирование деталей и узлов конкурентоспособных машин [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю. А. Остяков, И. В. Шевченко, 2013. – 335 с. ЭБС "Лань". Ссылка на текст учебника: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=30428](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=30428).

### References

1. Dunaev, Petr Fedorovich. Machine parts. Course design: [textbook. manual for mechanical engineering specialties prof. education]. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – 560 from 90 copies..
2. Kurmaz, Leonid Vladimirovich. Design of units and machine parts: [ref. educational method. manual for universities]. – M.: Higher. school, 2007. – 455 pp. 51 copies.
3. Lelikov, Oleg Pavlovich. Fundamentals of calculation and design of machine parts and assemblies [Electronic resource]: [lecture notes on the course "Machine Parts" for technical specialties of universities] / O. P. Lelikov, 2007. – 464 p. EBS "Lan". Link to the text of the textbook: [https://e.lanbook.com/book/745#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/745#book_name).
4. Mezhov V. G., Chumakov V. F. [Method for assessing the reliability of dynamic parameters in the design of mechanical systems]. Lesnoy i khimicheskiy komplekсы – problemy i resheniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. ["Forest and chemical complexes – problems and solutions": materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2012, P. 25-26. (In Russ.).
5. Ostyakov Yu. A. Design of parts and assemblies of competitive machines [Electronic resource]: textbook / Yu. A. Ostyakov, I. V. Shevchenko, 2013. – 335 p. EBS "Lan". Link to the text of the textbook: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=30428](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=30428).

© Межов В. Г., Брангин Д. Ю., Приходько А. С., 2023

УДК 629.3.083.4

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ

В. С. Непомнящий, Н. А. Артищева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nvs0407033@yandex.ru

*Рассмотрен принцип работы стенда для проверки тормозных дисков. Произведен анализ достоинств и недостатков существующих конструкций. Предложен вариант устранения основного недостатка.*

*Ключевые слова: стенд, тормозной диск, опора, ограничительные накладки.*

## MODERNIZATION OF THE STAND FOR CHECKING THE BRAKE SYSTEM

V. S. Nepomnyashchy, N. A. Artisheva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nvs0407033@yandex.ru

*The principle of operation of the stand for checking brake discs is considered. The advantages and disadvantages of existing structures are analyzed. A variant of eliminating the main drawback is proposed.*

*Keywords: stand, brake disc, support, restrictive pads.*

Техническое обслуживание автомобильной техники является приоритетной задачей для любого производства. По причине неисправностей тормозной системы происходит большое количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП), поэтому необходимо проводить своевременную диагностику с большей точностью.

На современных пунктах технического обслуживания и в автосервисах используются различные стенды для проверки тормозных дисков. Большинство моделей данного оборудования выполняются в виде платформенной базы с функциональными компонентами, электротехнической основой и цифровыми средствами контроля рабочего процесса. Конструкцию формируют металлические панели, удерживающие площадку для стоянки транспортного средства. Движение в наиболее распространенных барабанных моделях обеспечивает роликовая установка [1].

Чаще встречаются роликовые стенды, принцип работы которых заключается в том, что барабанные установки сами приводятся в движении путём электродвигателя, то есть данная установка позволяет проверять автотранспортное средство без необходимости включения двигателя. Установка имитирует взаимодействия колёс с дорожным полотном, а так же можно анализировать торможения на разных состояниях дорожного полотна. В момент торможения датчики регистрируют остановку колёс с их замасливанием, после чего проверяют уровень биения дисков, выявляя подклинивания и прочие дефекты. Информация о произведенных испытаниях отражается на дисплее контролирующего устройства. Весь процесс диагностики может происходить в автоматическом режиме [2]. Пример устройства одного из стендов представлен на рис. 1.

Основным недостатком данного стенда является то, что колею на подвижных опорах (роликах) не выставляются под каждое транспортное средство индивидуально, то есть ролики не имеют ограничителей по бокам. Из-за чего ось автомобиля скатывается вбок при торможении, хотя она должна оставаться на той же линии, где и было начато торможение, без смещений вбок. Это происходит из-за того, что при проверке тормозов на стенде в момент торможения на роликах возникает разворачивающий момент силы, что не позволяет максимально точно оценить эффективность тормозной системы. Чаще всего этот побочный эффект диагностики наблюдается при проверке передней тормозной системы ТС. В момент торможения ось автомобиль начинает уводить в сторону, что и не позволяет максимально точно измерить тормозное усилие [3].

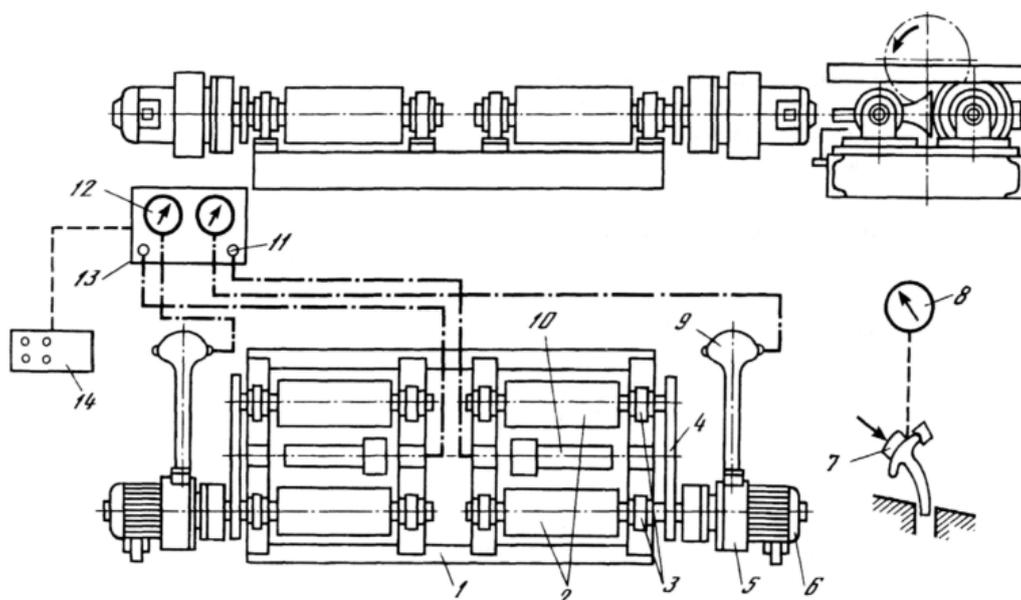


Рис. 1 Схема роликового тормозного стенда силового типа:

- 1 – рама, 2 – ролики, 3 – подшипники, 4 – цепная передача, 5 – редуктор, 6 – электродвигатель,  
 7 – датчик усилия на педали, 8 – измеритель усилия на педали, 9 – датчик тормозной силы,  
 10 – промежуточный ролик, 11 – указатель блокировки колеса, 12 – измерители тормозной сил,  
 13 – пульт управления, 14 – блок дистанционного управления

В качестве решение данной проблемы предлагается подбирать колею каждого технического средства индивидуально, то есть ограничивать рабочую зону подвижных роликов. Этого можно достичь путём изготовления накладок (пластин) на рабочую зону роликов, которые необходимо изготовить из конструкционной стали 45 [4]. Прочностные характеристики стали 45 прекрасно подходят для накладок, а так же это очень экономичное решение.

Это способ позволит увеличить точность измерения при малых затратах. Данные накладки будут устанавливаться поверх роликов и оставлять только нужный размер калии для автотранспортных средств. Это позволит измерять тормозное усилие с большей точностью, так как ограничительные накладки не будут давать техническому средству съезжать в сторону по длине роликов.

#### Библиографические ссылки

1. Эксплуатация оборудования для диагностики легковых автомобилей / А.М. Харазов, Ю.Н. Фролов, В.С. Щербушенко, К.В. Обиденный // М. : Транспорт, 1980. – 160 с.
2. Устройство для проверки тормозов. Авто Сервис. [Электронный ресурс] URL: <https://ivspecodezda.ru/ustroystvo-dlya-proverki-tormozov/> (дата обращения: 12.09.2023).
3. Шадыев Е.Р. Повышение эффективности технической эксплуатации автомобилей путем совершенствования метода диагностирования тормозных систем с гидравлическим приводом по изменению угловой скорости вывешенных колес: дис. ... канд. тех. наук. Саратов: 2002, 199 с.
4. Материаловедение и технология материалов: Учебное пособие. / А.И. Батышев, А.А. Смолькин, и др. // М. : Инфра-М, 2012. 288 с.

#### References

1. Operation of equipment for diagnostics of passenger cars / A.M. Kharazov, Yu.N. Frolov, V.S. Shcherbushenko, K.V. Obidenny // M. : Transport, 1980. – 160 p.
2. Brake test device. Auto Service. [Electronic resource] URL: <https://ivspecodezda.ru/ustroystvo-dlya-proverki-tormozov/> (accessed: 12.09.2023).
3. Shadyev E.R. Improving the efficiency of technical operation of cars by improving the method of diagnosing brake systems with hydraulic drive by changing the angular velocity of the suspended wheels: dis. ... candidate of Technical Sciences. Saratov: 2002, 199 p.
4. Materials science and technology of materials: A textbook. / A.I. Batyshev, A.A. Smolkin, et al. // Moscow : Infra-M, 2012. 288 p.

УДК 531.3

## МЕХАНИЧЕСКИЙ ГИСТЕРЕЗИС ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ С УЧЁТОМ СЖИМАЕМОСТИ

А. В. Пашковский

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: pashkovskiyav@mail.sibsau.ru

*Рассматривается экспериментальное обнаружение механического гистерезиса при изгибе стержня из углепластика под действием сосредоточенной нагрузки поперечного направления.*

*Ключевые слова: углепластик, гистерезис, сосредоточенная нагрузка, изгиб.*

## MECHANICAL HYSTERESIS DURING TRANSVERSE BENDING OF AN ELASTIC ROD TAKING INTO ACCOUNT COMPRESSIBILITY

A. V. Pashkovsky

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: pashkovskiyav@mail.sibsau.ru

*The experimental detection of mechanical hysteresis during bending of a carbon fiber rod under the action of a concentrated load of the transverse direction is considered.*

*Keywords: carbon fiber, Hysteresis, concentrated load, bending.*

При решении современных задач по разработке устройств микромеханики возникает необходимость поиска точных выражений для форм изгиба различных конструкций: оболочек и стержневых систем. Это связано с тем, что величина прогиба соизмерима с размерами конструкций. В работе [1] исследовано поведение тонкого упругого стержня под действием сосредоточенной нагрузки с учетом сжимаемости стержня и выявлено, что при определенной величине внешней нагрузки в стержне возникает явление гистерезиса. В связи с этим существует необходимость проведения эксперимента, позволяющего выявить гистерезис на практике.

Эксперименты проводились с образцами из углепластиков, полученных из ровинга Toray T700SC из углеволокна в три слоя, залитого эпоксидной смолой ЭД-20, смешанной с отвердителем, и выдержанных до полного отверждения.

Предполагаемая схема установки представлена на рисунке 1

На опоре (О) установлена вертикально штанга (Ш), к которой крепится зажим (З). В зажим закреплён один из концов стержня, к другому концу крепится нить. На свободный конец нити подвешиваются грузы, под действием которых стержень будет изгибаться. Установка ставится около стены, после каждого увеличения нагрузки состояние фотографируется. Изображения обрабатываются в программе Graph2Digit.

Если стержень изначально не имел дефектов, то гистерезис не обнаруживался вследствие того, что упругие параметры стержня во всех направлениях определялись параметрами эпоксидной смолы, которая имеет аморфную структуру, поэтому обладает изотропией. После искусственного создания дефектов внутренней структуры путём локального нагревания стержня пламенем свечи до оплавления связующей смолы эксперимент был повторён. Так как стержень стал анизотропным, был выявлен гистерезис, заключающийся в том, что при постепенном нагружении и разгрузке величина прогиба была разной.

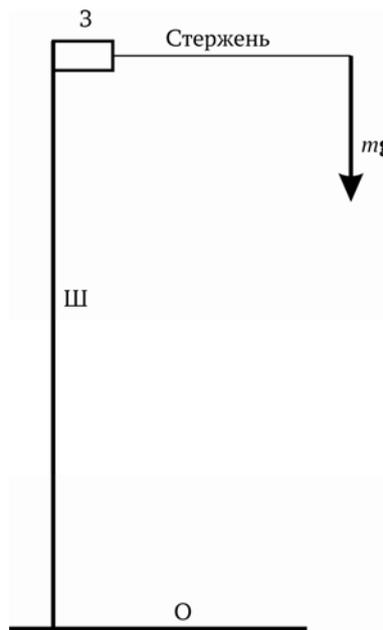


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки.  
О – опора, Ш – штанга, З – зажим

#### Библиографическая ссылка

1. Исакова, В. В. Нелинейный изгиб и устойчивость упругой двухзвеньевой стержневой системы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск : СибГТУ, 2008. – 87с.

#### Reference

1. Isakova V. V. *Nelinejnyj izgib i ustojchivost' uprugoj dvuhzven'evoj sterzhnevoj sistemy. Dis/ kand. fiz.-mat. nauk.* [Nonlinear bending and stability of an elastic two-link rod system. Cand. phys.-mat. sci. diss]. Karsnoyarsk, SibGTU Publ. 2008, 87 p.

© Пашковский А. В., 2023

УДК 621.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ И ИХ УПРАВЛЕНИЕ В КОНСТРУКЦИЯХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. А. Рожкова, А. В. Кустов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: e\_rozhok@vk.com

*В статье рассматриваются основные принципы возникновения и распространения вибраций, их влияние на структурные элементы и компоненты космических аппаратов. В результате анализа современных исследований предлагаются новые подходы и методики.*

*Ключевые слова: вибрации, контроль, оборудование, конструкция, надежность.*

## INVESTIGATION OF MECHANICAL VIBRATIONS AND THEIR CONTROL IN SPACECRAFT STRUCTURES

E. A. Rozhkova, A.V. Kustov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: e\_rozhok@vk.com

*The article discusses the basic principles of the emergence and propagation of vibrations, their influence on the structural elements and components of spacecraft. As a result of the analysis of modern research, new approaches and techniques are proposed.*

*Keywords: vibrations, control, equipment, design, reliability.*

Механические вибрации представляют собой нежелательные колебания, которые влияют на работу множества технических систем, включая конструкции космических аппаратов. В силу особенностей работы в условиях безгравитационного пространства и высоких скоростей, космические аппараты подвержены значительным воздействиям механических вибраций, которые могут привести к серьезным последствиям, включая повреждение оборудования, снижение производительности и даже потерю миссии.

Масштаб влияния вибрационных процессов несложно оценить по последствиям, которые могут возникнуть: колебания различных форм ракетного двигателя, разрушение вращающегося на больших скоростях турбонасосного агрегата, выход из строя систем автоматики и регулирования, нераскрытие солнечных батарей, потеря устойчивости космического аппарата.[1]

Исследования динамики сложных механических систем, подвергающихся действию ударных и вибрационных нагрузок, особенно при создании и разработке новых образцов ракетно-космической техники являются одним из перспективных направлений прикладной механики, так как вопросы виброустойчивости исследованы не совсем полно.

Для эффективного управления механическими вибрациями также необходимо проводить исследования и анализ их характеристик. Это позволяет определить причины возникновения вибраций, их частоты, амплитуды и длительность. С помощью таких исследований можно оптимизировать конструкцию космического аппарата, сделав ее более устойчивой к вибрациям или разработать специальные системы контроля и управления, которые будут реагировать на вибрации и снижать их воздействие на системы.

Большое значение имеет также расчет и проектирование систем управления механическими вибрациями. Они должны быть достаточно чувствительными для обнаружения вибраций и оперативно

реагировать на них, чтобы снизить уровень вибраций до допустимого. Для этого можно использовать такие методы, как регулировка частоты колебаний или изменение характеристик системы подвески.

Инновационные технологии также играют важную роль в исследовании и управлении механическими вибрациями в конструкциях космических аппаратов. Например, применение интеллектуальных материалов, которые способны изменять свои свойства под воздействием внешних факторов, может существенно улучшить устойчивость к вибрациям конструкций.

Виброизоляция – метод виброзащиты, основанный на ослаблении голономных и неголономных связей между источником вибраций и объектом виброзащиты путём изменения собственной частоты колебаний связующей конструкции. Как правило, частота подвеса в связующей конструкции должна быть существенно ниже частоты источника вибровозмущений. Например, источник выдает возмущения с частотой колебаний 30 Гц, а виброизолятор имеет собственную частоту колебаний в 10 Гц, что позволяет эффективно снижать вибрации, приходящие к изолируемому объекту (рисунок 1). [2]

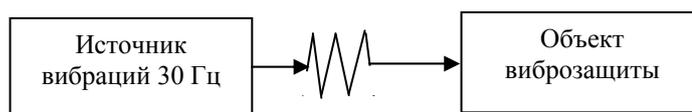


Рисунок 1. Схема работы виброизоляции

В конструкции спутников вибрация является результатом воздействия их на окружающую среду, особенно в суровых условиях запуска. Хотя передовые технологии изготовления спутников обычно применяется, однако во избежание негативного воздействия окружающей среды, в которой работают спутники, фактор вибраций довольно трудно контролировать, и он может стать неприятным осложнением, приводящим к разрушению. В то же время конструкция спутника может сильно повлиять на его вибрационные характеристики. [3]

Технологические методы борьбы с вибрацией [4]: Повышение точности обработки и сборки; Поэлементная балансировка роторов и балансировка их в сборе; Контроль качества подшипников качения; Повышение точности обработки посадочных мест под подшипники в соответствии с точностью обработки колец подшипников; Исключение деформаций от температуры и давления; Обеспечение простоты контроля вибрации.

Продолжительность эксплуатации любого электротехнического оборудования значительно уменьшается при механических воздействиях на него таких как: вибрации, удары, линейные перегрузки, акустические шумы.

Эти механические воздействия как правило возникают при работе двигателей, редукторов, вращающиеся разбалансированные массы, взрывы. Результаты действия их на электротехническое оборудование очень часто приводят: к изменению параметров электротехнических элементов таких как – сопротивление, емкость, индуктивность, магнитная проницаемость; к ухудшению электрических контактов; к наводкам и изменению параметров электрических, магнитных и электромагнитных полей и т. д. [5].

Одним из главных вопросов исследования механических вибраций является разработка методов и средств для их управления. Управление вибрациями в конструкциях космических аппаратов позволяет снизить уровень вибраций, улучшить работу оборудования и обеспечить безопасность полета.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие заключения: Исследования механических вибраций и их управления являются важной задачей для обеспечения надежности и стабильности работы космических аппаратов. Математическое моделирование механических вибраций в конструкциях космических аппаратов позволяет учесть особенности работы аппарата в условиях микрогравитации и других факторов. Разработанные методы и средства управления вибрациями позволяют снизить уровень вибраций и повысить надежность работы космических систем.

В итоге, исследование механических вибраций и их управление в конструкциях космических аппаратов является важным направлением, которое позволяет улучшить надежность и эффективность космических миссий. Это требует проведения комплексных исследований, разработки инновационных решений и применения передовых технологий. Эти усилия помогут не только снизить уровень вибраций и повысить долговечность конструкций космических аппаратов, но и обеспечат безопасность и эффективность выполнения космических миссий.

### Библиографические ссылки

1. Бакулин Я.Ю., Журавлев В.Ю. Виброиспытания изделий ракетно-космической техники // Решетневские чтения. 2014. №18.
2. Кузнецов, Д. А. Обеспечение виброзащиты прецизионных космических аппаратов. Часть 2. Конструкционные методы / Д. А. Кузнецов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2020. – № 3(49). – С. 46-49.
3. Соустин Б. П., Тестоедов Н. А., Рудомёткин А. Г., Алькин А. В. Виброиспытания космических аппаратов. М. : Наука, 2000. 171 с.: ил.
4. Юдина З.А., Синиченко М.И., Ладыгин А.П., Синьковский Ф.К., Усманов Д.Б. Причины возникновения вибрации в агрегате электронасосном космического аппарата и способы ее снижения // Космические аппараты и технологии. 2021. №2 (36).
5. Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: учеб.пособие. – Владимир: Владим. гос. ун-т, 2001. – 256 с.

### References

1. Bakulin YU.YU., Zhuravlev V.YU. Vibrational testing of rocket and space equipment // Reshetnevskiye readings. 2014. №18.
2. Kuznetsov, D.A. Providing vibration protection for precision spacecraft. Part 2. Structural methods / D.A. Kuznetsov // Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkin. – 2020. – №3(49). – P. 46-49.
3. Soustin B.P., Testoyedov N.A., Rudomyotkin A.G., Alkin A.V. Vibrational testing of spacecraft. M.: Nauka, 2000. 171 p.: ill.
4. Yudina Z.A., Sinichenko M.I., Ladygin A.P., Sinkovsky F.K., Usmanov D.B. Causes of vibration in an electronic pump unit of a spacecraft and methods of reducing it // Spacecraft and Technology. 2021. №2 (36).
5. Talitsky E.N. Protection of electronic devices from mechanical impacts. Theoretical foundations: textbook. – Vladimir: Vladimir State University, 2001. – 256 p.

© Рожкова Е. А., Кустов А. В., 2023

УДК 621.8

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ГРУЗОПОДЪЁМНОГО БАРАБАНА

К. А. Скоробогатов, Н. С. Шереметьев, Н. А. Артищева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: skorobogatov.kostya@mail.ru  
E-mail: nina626-24@mail.ru

*Рассмотрены грузоподъемные механизмы, используемые для обслуживания габаритного оборудования. Определены его основные составляющие элементы. Произведен анализ материала для изготовления грузоподъемного барабана.*

*Ключевые слова: механизм, барабан, материал, оборудование, машина.*

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY AND SAFETY OF THE LIFTING DRUM

K. A. Skorobogatov, N. S. Sheremetyev, N. A. Artisheva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: skorobogatov.kostya@mail.ru  
E-mail: nina626-24@mail.ru

*Lifting mechanisms used for maintenance of dimensional equipment are considered. Its main constituent elements are defined. The analysis of the material for the manufacture of a lifting drum was carried out.*

*Keywords: mechanism, drum, material, equipment, machine.*

**Введение:** При производстве и обслуживании габаритного оборудования и его элементов используются грузоподъемные машины и механизмы. В зависимости от назначения и установки грузоподъемные машины предназначены для перемещения грузов по вертикали и передачи их из одной точки площади, обслуживаемой машиной в другую. В зависимости от конструкции, как правило, грузоподъемные машины могут состоять из механизма подъема груза, механизма передвижения крана, механизма передвижения тележки и механизма поворота стрелы [1]. В свою очередь каждый из механизмов состоит из основных конструктивных элементов.

Рассмотрим механизм подъема груза (рис. 1), который состоит из электродвигателя, соединительной муфты с тормозным шкивом, тормоза, редуктора, барабана и его опоры. В большинстве случаев, механизм подъема груза состоит из стандартных механизмов, выполненных в соответствии с ГОСТ, что в значительной степени упрощает обслуживание, а в дальнейшем и ремонт всего механизма. Исключение – это грузоподъемный барабан [2].

Грузоподъемные барабаны могут иметь различные конструкции, включая гладкие или с канавками, в зависимости от типа каната и спецификаций крана. Глубина канавок и наличие ребордов так же могут различаться в зависимости от требований к надежности и безопасности работы крана [2].

Грузовой барабан – это важный компонент в кранах и поднимающих устройствах, который используется для намотки и натяжения каната или цепи, необходимых для поднятия и перемещения грузов. Структура и функции представлены ниже (рис.2) [3].

Основные компоненты грузового барабана [4]:

– диск сферический: верхняя часть барабана, которая имеет сферическую форму и служит для равномерного намотки и раскатывания каната или цепи, и обеспечения правильного распределения нагрузки.

– крышка: крышка закрывает верхнюю часть барабана и защищает его от пыли и влаги, также может иметь устройства для натяжения и фиксации каната.

- обойма зубчатая: эта деталь служит для намотки и удержания каната или цепи на барабане, имеет зубчатую структуру, которая взаимодействует с другими механизмами для поднятия и опускания груза.
- нарезка правая и левая: нарезки – это части барабана, на которых наматывается канат или цепь, они могут быть как правой, так и левой стороны, в зависимости от конструкции крана и направления намотки.
- вал: является центральной осью барабана, которая обеспечивает его вращение и соединения с механизмами подъема и передвижения крана.
- подшипниковый узел: этот компонент обеспечивает плавное вращение вала барабана, так же снижает трение и износ, что важно для долговечности барабана.
- Выключатель конечный: устройство служит для определения конечных положений барабана, что позволяет управлять остановкой и направлением движения груза.
- кронштейн: крепит барабан к другим частям крана или механизму поднятия.
- подставка: служит для поддержания барабана и его стабилизации.

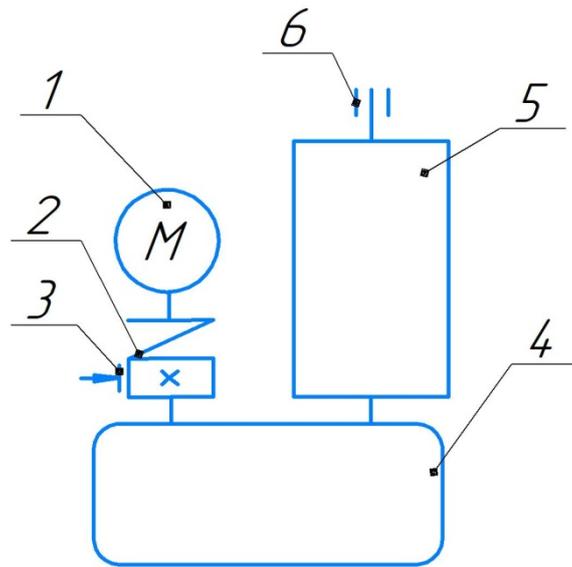


Рис. 1 Кинематическая схема механизма подъема груза  
 1 – электродвигатель, 2 – муфта с тормозным шкивом, 3 – тормоз,  
 4 – редуктор, 5 – грузоподъемный барабан, 6 – опора барабана.

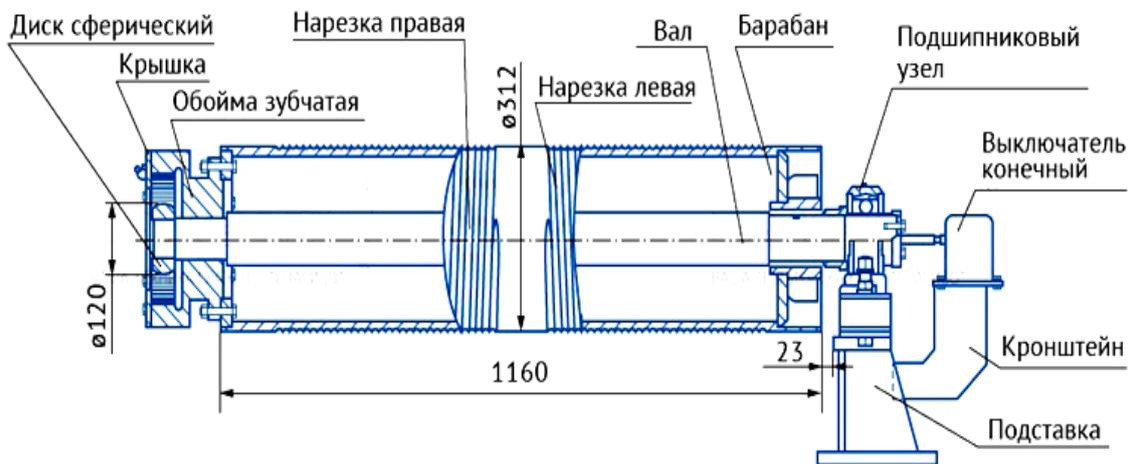


Рис. 2 Устройство грузового барабана

Грузовой барабан вращается с помощью механической системы или электродвигателя. Канат или цепь наматываются на нарезки барабана при поднятии груза, а затем отпускаются при опускании. В процессе поднятия и опускания груза барабан вращается, обеспечивая необходимое натяжение и намотку каната или цепи.

Важно учесть, что выбор материала для изготовления барабана должен соответствовать требованиям по прочности и долговечности в рабочих условиях, а также учитывать нагрузку и окружающую среду, в которой будет эксплуатироваться кран.

По способу изготовления барабаны бывают [1]:

– литые из чугуна (СЧ 15 – 32) или стали (сталь 25Л);

– сварные из стали – тонколистовой с накатанными канавками (для легких условий работы) или из толстостенных труб с нарезными канавками;

– сварно-литые изготовленные из конструкционной низколегированной стали.

Способ изготовления барабанов зависит напрямую от условий эксплуатации и режима работы механизма.

При современном производстве чаще всего в качестве заготовки барабана используется обечайка, при этом заготовка может состоять из нескольких частей и иметь диафрагму для усиления конструкции. В дальнейшем на обечайку с помощью сварки привариваются фланцы, на которые болтами прикрепляются ступицы, в которых запрессован вал. Для соединения редуктора с барабаном используется зубчатый венец или зубчатая ступица [4].

При изготовления барабанов такого типа используют сталь 10ХСНД которая соответствует ГОСТ 19281-89. Данный материал имеет особенность – склонность к холодным трещинам, и в качестве неразрушающего контроля применяется ультразвуковой эхоимпульсный метод и магнитно – порошковый метод. Большая толщина заготовок способствует быстрому охлаждению ЗТВ при сварке, что может привести к трещинообразованию [5].

Но, не смотря на данный недостаток, сварно-литые грузовые барабаны имеют больший срок службы, чем барабаны изготовленные литьем, в среднем на 35 %, и при модернизации грузоподъемного оборудования чаще всего устанавливают барабаны, изготовленные из стали 10ХСНД.

#### Библиографические ссылки

1. Александров П.М. Грузоподъемные машины – 2-е изд. перераб. М. ; Наука, 1986. 532 с.
2. Таубер Б.А. Подъемно – транспортные машины изд. перераб. М. : Экология. 1991. 298 с.
3. Требования к грузовым барабанам [Электронный ресурс] URL: <https://el-kran.ru/biblioteka-elkran/trebovaniya-predyavlyaevye-k-gruzovym-barabanam/> (дата обращения: 11.09.2023).
4. Гришкин В.Г. Оценка технического состояния грузоподъемных кранов: Учебное пособие. СПб. ; СПГУВК, 2000. – 197 с.
5. Адаскин А.М. Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов. М. ; Форум, 2018. 592 с.

#### References

1. Alexandrov P.M. Lifting machines – 2nd ed. pererab. M. ; Nauka, 1986. 532 p.
2. Tauber B.A. Lifting and transport machines ed. pererab. M. : Ecology. 1991. 298 p.
3. Requirements for cargo drums [Electronic resource] URL: <https://el-kran.ru/biblioteka-elkran/trebovaniya-predyavlyaevye-k-gruzovym-barabanam/> (accessed: 11.09.2023).
4. Grishkin V.G. Assessment of the technical condition of lifting cranes: Textbook. SPb. ; SPGUVK, 2000. – 197 p.
5. Adaskin A.M. Materials science and technology of metallic, non-metallic and composite materials. M. ; Forum, 2018. 592 p.

УДК 621.825.54

## ПРИМЕНЕНИЕ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК НА ПРИВОД СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

А. А. Соболева, С. Н. Долматов, Н. А. Артищева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ansob\_1209@mail.ru

*В работе был исследован привод барабанной сушилки. Сушилки необходимы для сушки щепы до нужного уровня влажности. Фрикционные дисковые муфты нашли широкое применение в лесной промышленности. С их помощью выполняется разъединение входного и выходного валов в критических ситуациях, когда величина вращающего момента превышает допустимую при кратковременных перегрузках. При работе привода сушилки возникает пиковая нагрузка, связанная с перегрузом барабана. Задача работы – обосновать и рассчитать фрикционную муфту для снижения пиковой нагрузки. Выводы и рекомендации могут быть использованы при проектировании и модернизации конструкции барабанной сушилки.*

*Ключевые слова:* муфта, барабанные сушилки, кинематическая схема, пиковая нагрузка.

## THE USE OF A FRICTION CLUTCH IN ORDER TO REDUCE PEAK LOADS ON THE DRIVE OF THE DRYING DRUM

A. A. Soboleva, S. N. Dolmatov, N. A. Artishcheva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ansob\_1209@mail.ru

*The drive of the drum dryer was investigated in the work. Dryers are necessary for drying wood chips to the desired humidity level. Friction disc couplings are widely used in the forestry industry. With their help, the separation of the input and output shafts is performed in critical situations when the torque exceeds the permissible value for short-term overloads. When the dryer drive is operating, a peak load occurs due to the overload of the drum. The task of the work is to justify and calculate the friction clutch to reduce the peak load. Conclusions and recommendations can be used in the design and modernization of the drum dryer design.*

*Keywords:* coupling, drum dryers, kinematic scheme, peak load.

Барабанные сушилки являются эффективным инструментом в лесной промышленности для сушки древесины перед ее использованием в производстве. Они могут быть использованы как для массовой сушки большого количества древесины, так и для сушки отдельных пиломатериалов.

Существует несколько типов барабанных сушилок, которые могут быть использованы в лесной промышленности.

### 1. Прямопоточные сушилки

Прямопоточные сушилки являются самыми распространенными типами барабанных сушилок в лесной промышленности. Древесина загружается в барабан, который вращается, чтобы обеспечить равномерную сушку на всем протяжении. Горячий воздух циркулирует через барабан и обеспечивает быструю и эффективную сушку.

### 2. Обратного потока сушилки

Обратного потока сушилки также часто используются в лесной промышленности. Материала загружается на один барабан, а горячий воздух циркулирует через него, затем проходит через обменник тепла и возвращается на другой барабан для повторной циркуляции.

### 3. Инфракрасные сушилки

Они используют инфракрасное излучение для сушки древесины. Они могут быть полезны при сушке ценных пород древесины, таких как красное дерево, махагони, и т.д. В этих сушилках используются лазеры и нагревательные элементы, которые излучают инфракрасные лучи на древесину, что приводит к ее быстрой и равномерной сушке.

В этой конструкции реализован метод конвективной сушки. Этот метод отличается простотой конструкции барабанных сушилок, используемых в этом процессе, высокой производительностью работы и универсальностью. Поэтому использование этих сушильных аппаратов широко применяется различных отраслях экономики. Но у этого типа сушилок есть и определенные недостатки [4].

Возможна ситуация, когда в камеру сушильного барабана будет загружено существенно больше материала, чем предусмотрено параметрами привода сушилки. В таких ситуациях будет происходить перезагрузка привода, которая может привести к его поломке. Ограничить величину регулируемого крутящего момента привода можно несколькими способами, например, по величине пикового тока, потребляемого обмотками электрического двигателя. Но наиболее просто можно ограничить крутящий момент при помощи муфты с возможностью не постоянной передачи момента, например, применив фрикционную муфту [3].

**Задачи исследования:**

1. Анализ кинематической схемы привода сушильного барабана.
2. Анализ способов ограничения мощности и момента.
3. Расчет фрикционной муфты для обеспечения снижения пиковой нагрузки.

**Кинематическая схема** – это схема, на которой показана последовательность передачи движения от двигателя через передаточный механизм к рабочим органам и их взаимосвязь. На кинематических схемах изображают те элементы машины или механизма, которые принимают участие в передаче движения (зубчатые колёса, валы, шкивы, муфты и др.) без соблюдения размеров и пропорций [1].

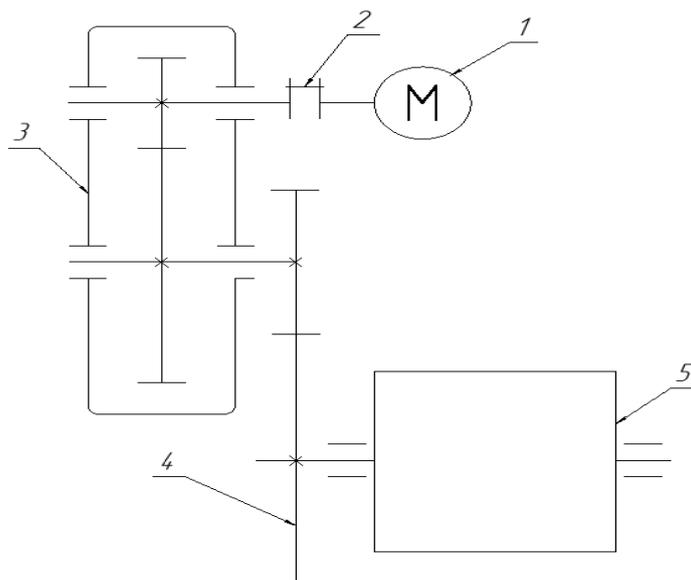


Рисунок 1 – Кинематическая схема привода барабанной сушилки

На кинематической схеме (рисунок 1) показаны основные составляющие привода барабанной сушилки:

1-электродвигатель; 2-муфта жесткая глухая; 3-редуктор; 4- зубчатая пара; 5-барабан сушилки.

В приводе сушильного барабана один из элементов – это муфта. Она предназначена для соединения вращающихся элементов привода и передачи крутящего момента без изменения направления вращения. В стандартной кинематической схеме для соединения вала электродвигателя и быстроходного вала редуктора использована жесткая фланцевая муфта. Это простая и недорогая конструкция. Но в случае перегрузки привода, когда крутящий момент на быстроходном валу редуктора превысит момент двигателя, произойдет перегрузка привода. И хотя асинхронные двигатели переменного тока весьма терпеливы и допускают кратковременную перегрузку по крутящему моменту, эти явления не проходят бесследно и снижают ресурс. Нами предложено установить фрикционную муфту с возможностью пробуксовки в целях снижения пиковых нагрузок на привод сушилки. Фрикционная муфта

представлена на рисунке 2. Она защищает важные детали машины от излишнего износа и позволяет снизить риски перегрузки.

Дисковая фрикционная муфта состоит из полумуфты укреплений на валу неподвижно, а вторая часть полумуфты подвижна в осевом направлении, между двумя полумуфтами установлена фрикционная накладка.

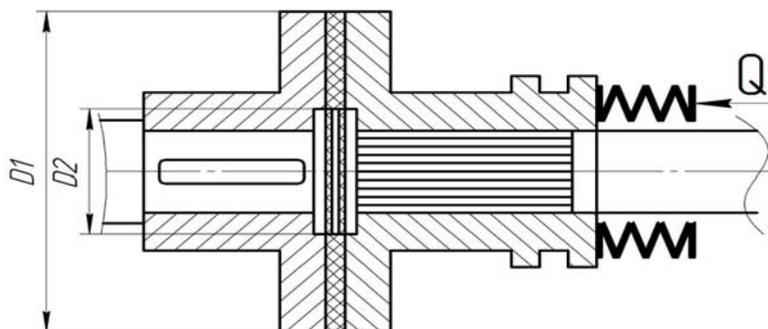


Рисунок 2 – Дисковая фрикционная муфта

Фрикционная муфта получила распространение благодаря своей бесшумности, способностью работать при высоких частотах вращения валов и возможности большого числа включений и выключений. При перегрузке муфта буксует, поглощая механическую энергию, преобразуя ее в тепловую, практически не прекращая передачу момента.

Для определения основных параметров фрикционной муфты, проведем расчет [2]. В качестве исходных данных были приняты: расчетный крутящий момент на приводном валу сушилки принят равным 1680 Нм, число оборотов 58 об/мин. Принимаем передаточное отношение цилиндрического редуктора = 8, открытой зубчатой пары = 3. Тогда Расчетный крутящий момент на быстроходном валу с учетом потерь составит.

$$M_{кр} = \frac{T}{\eta} \quad (1)$$

$$M_{кр} = \frac{1680}{3 \cdot 8 \cdot 0,75} = 93 \text{ Нм}$$

Число оборотов быстроходного вала определится по зависимости

$$n = n_{нар} \cdot i \quad (2)$$

$$n = 58 \cdot 3 \cdot 8 = 1392 \text{ об/мин}$$

Принимаем конструкцию в виде многодисковой фрикционной муфты серии МН 5664-65, нормального исполнения №10, расчетный крутящий момент 110 Нм, диаметры валов 42 мм, число дисков  $Z=12$ ,  $D_{нар}=125$  мм,  $D_{внут}=92$  мм. Найдем действующее давление на поверхностях трения муфты.

$$P = \frac{2000T_{расч}}{\pi f Z b D_{ср}^2} \quad (3)$$

$$D_{ср} = \frac{D_{нар} + D_{вн}}{2} = \frac{125 + 92}{2} = 108,5 \text{ мм}$$

$$b = \frac{D_{нар} - D_{вн}}{2} = \frac{125 - 92}{2} = 16,5 \text{ мм}$$

$$P = \frac{2000 \cdot 93}{3,14 \cdot 0,08 \cdot 12 \cdot 16,5 \cdot 108,5^2} = 0,32 \text{ МПа}$$

Определяем скорость на среднем диаметре поверхности трения

$$V = \frac{\pi D_{\text{ср}} n}{60000} \quad (4)$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 108,5 \cdot 1392}{60000} = 7,9 \text{ м/с}$$

Расчет силы прижима на диски муфты

$$F = \frac{2000T}{fzD_{\text{ср}}} \quad (5)$$

$$F = \frac{2000 \cdot 93}{0,08 \cdot 12 \cdot 108,5} = 1785 \text{ Н}$$

В процессе расчёта дисковой фрикционной муфты были найдены: Величина момента трения, средний радиус рабочих поверхностей дисков и нажимающие усилие.

Вывод.

1. В процессе анализа кинематической схемы сушилки было установлено, что передача крутящего момента от приводного электродвигателя до барабана сушилки осуществляется путем «жёстких» кинематических связей, без возможности смягчения ударных нагрузок и ограничения крутящих моментов.

2. Нами были рассмотрены способы ограничения реализуемого крутящего момента. Для снижения риска перегрузки привода, на наш взгляд следует использовать фрикционную муфту. При перегрузке муфта, буксирует поглощая механическую энергию, преобразуя ее в тепловую, не прекращая передачу момента, что позволяет сушильному барабану не прекращать работу, и снизить не досушивание щепы.

3. Нами был проведен расчет фрикционной муфты для обеспечения снижения пиковых нагрузок.

#### Библиографические ссылки

1. Артоболевский И.И. Теория машин и механизмов. М. ; Наука, 1988. 322 с.
2. Иванов М.Н. Детали машин: учеб. пособие для вузов. Изд. 3е перераб. и доп. М. ; Наука, 1976. 396 с.
3. Мудров А. Г. Снижение пиковых нагрузок при пуске механизма подъема груза в кранах // Известия КазГАСУ. 2018. №2 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-pikovyh-nagruzok-pri-puske-mehanizma-podema-gruza-v-kranah> (дата обращения: 01.09.2023).
4. Суржик Т.В., Щекина В.А. Некоторые аспекты использования сушильных технологий // АЭЭ. 2013. №17 (139). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-ispolzovaniya-sushilnyh-tehnologiy> (дата обращения: 01.09.2023).

#### References

1. Artobolevsky I.I. Theory of machines and mechanisms. M. ; Nauka, 1988. 322 p.
2. Ivanov M.N. Machine parts: textbook. manual for universities. Ed. 3e reprint. and additional M. ; Nauka, 1976. 396 p.
3. Mudrov A. G. Reduction of peak loads at the start of the lifting mechanism of the load in the edges // Izvestiya KazGASU. 2018. №2 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-pikovyh-nagruzok-pri-puske-mehanizma-podema-gruza-v-kranah> (accessed: 01.09.2023).
4. Surzhik T.V., Shchekina V.A. Some aspects of the use of drying technologies // AE. 2013. No. 17 (139). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-ispolzovaniya-sushilnyh-tehnologiy> (accessed: 01.09.2023).

© Соболева А. А., Долматов С. Н., Артищева Н. А., 2023

УДК 621.9

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СМАЗКИ ЧЕРВЯЧНЫХ РЕДУКТОРОВ

О. А. Суханова, И. В. Трифанов \*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: olkasukhanova@mail.ru

*Показана возможность проведения смазки червячных редукторов с применением жидких масел и композиционного антифрикционного твердо-смазочного покрытия, позволяющих повысить КПД и срок службы червячных передач.*

*Ключевые слова: червячный редуктор, смазка композиционное твердо-смазочное покрытие.*

## COMBINED METHOD OF LUBRICATION OF WORM GEARBOXES

O. A. Sukhanova, I. V. Trifanov \*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: olkasukhanova@mail.ru

*The possibility of lubrication of worm gearboxes with the use of liquid oils and a composite antifriction solid-lubricating coating, allowing increasing the efficiency and service life of worm gears, is shown.*

*Keywords: worm gear, lubrication composite hard-lubricating coating.*

В приводах антенн систем спутниковой связи, а также в других механизмах находят применение червячным редукторам [1]. Одной из проблем эксплуатации червячных редукторов является высокое трение в зоне контакта червячного колеса и червячного вала, что негативно влияет как на срок службы механизма, так и на КПД привода в целом.

У червячного редуктора с передаточным отношением 1:100 КПД будет в среднем равняться 0,5, что указывает на 50% потерю мощности, которая переходит в тепловую энергию. Высокие температуры более 100°C приводят к деформации зубьев червячного колеса и образованию задиров на них, что приводит к поломке редуктора. В качестве радиаторов охлаждения на корпусах редукторов предусмотрены специальные ребра и применяют жидкую смазку.

Для проведения жидкой смазки используются вязкие теплоемкие редукторные масла, содержащие в своем составе пакет насадок для снижения задирообразования и исключения образования зоны сухого трения, когда между зубчатым колесом и валом отсутствует смазка.

В настоящее время наиболее распространенным является синтетические масла PAG или PAO, а также минеральные масла [2].

Лучшим считается масло PAG, так как его молекулы имеют высокую адгезию налипания масла на поверхность металла. Масло PAG может работать в диапазоне температур от -32°C до 140°C. При разных режимах работы (пуск, остановка, равномерная работа) область контакта рабочих поверхностей червячных пар может находиться как в условиях гидродинамического трения, так и в условиях граничной смазки. Особенно это может проявляться при большом радиусе сопряжения червячных пар в передачах типа ZT.

Для устранения указанных недостатков наряду с жидкой смазкой целесообразно применять, например, антифрикционное твердосмазочное, композиционное покрытие [3], которое предлагается наносить на витки червяка.

Покрытие состоит из двух слоев. Внутренний слой, прилегающий к подложке, имеет толщину 10-15 мкм и выполнен из молибдена. Внешний слой толщиной 15-50 мкм представляет собой твердую

смазку, и содержит дисульфид молибдена (Mo,Sz), графит и окись кадмия (CdO). Между внутренним и внешними слоями нанесен промежуточный слой 1-3 мкм из связующего на основе эпоксидной смолы. Данное композиционное покрытие обладает ресурсом работы до 20000 циклов в условиях нагрузки до 20кГс/мм<sup>2</sup>, с коэффициентом трения  $f=0,07 - 0,09$  при температуре от -100 до +250°C.

Указанное композиционное антифрикционное покрытие может работать в качестве смазки при сухом трении сопряженных поверхностей червячного редуктора, когда недостаточно жидкой смазки. При необходимости работы редуктора при температуре выше 250°C может быть использовано металлическое связующее, например, выполненное на основе никеля или бронзы. Применение комбинированной смазки позволяет повысить КПД и срок службы червячных передач.

#### Библиографические ссылки

1. Червячные редукторы [Электронный ресурс]. URL: <https://reduktora.pro/azticles/3759> (дата обращения: 20.08.2023).
2. Червячная передача [Электронный ресурс]. URL: <https://tpgargo.ru/press-czentr/blog/chervyachnaya-peredacha> (дата обращения: 23.08.2023).
3. Пат. 2211260 Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> С 23 С 28/00. Антифрикционное композиционное покрытие / Иванов Е.В., Савостина Т.В., Алонцева Л.В. № 2001135021/02 ; заявл. 26.12.2001 ; опубл. 27.08.2003, 7 с.

#### References

1. Worm gearboxes. Available at: <https://reduktora.pro/azticles/3759> (accessed 20.08.2023).
2. Worm gear. Available at: <https://tpgargo.ru/press-czentr/blog/chervyachnaya-peredacha> (accessed 23.08.2023).
3. Ivanov E.V., Savostina T.V., Alontseva L.V. *Antifriktsionnoe kompozitsionnoe pokrytie* [Antifriction composite coating]. Patent RF, no. 2211260, 2020.

© Суханова О. А., Трифанов И. В., 2023



**Секция**

**«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ  
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

УДК 666.762.16

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОВОЛОКНАМИ $Al_2O_3$ НА СВОЙСТВА КОРДИЕРИТОВОЙ ОГНЕУПОРНОЙ КЕРАМИКИ\*

Р. Г. Еромасов\*, М. Н. Васильева, Н. С. Симонова

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, Красноярск, Свободный пр., 79  
\*E-mail: kmp198@inbox.ru

*В работе представлены результаты исследования влияния нановолокон оксида алюминия на свойства кордиеритовой огнеупорной керамики. Установлено, что при введении нановолокон  $Al_2O_3$  возрастает механическая прочность керамического материала.*

*Ключевые слова: огнеупорная керамика, кордиерит, нановолокна  $Al_2O_3$ , водопоглощение, прочность при сжатии.*

## EFFECT MODIFICATION WITH ALUMINUM OXIDE NANOFIBERS ON THE PROPERTIES OF CORDIERITE REFRACTORY CERAMICS

R. G. Eromasov\*, M. N. Vasilyeva, N. S. Simonova

Siberian Federal University  
79, Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*E-mail: kmp198@inbox.ru

*The effect of aluminum oxide nanofibers on the properties of cordierite refractory ceramics has been study. It was established that  $Al_2O_3$  nanofibers introduction increases the mechanical strength of the ceramic material.*

*Keywords: refractory ceramics, cordierite,  $Al_2O_3$  nanofibers, water absorption, compressive strength.*

Среди известных огнеупорных материалов большой интерес вызывает кордиеритовая керамика, отличительной особенностью которой является низкий коэффициент термического расширения, что обуславливает ее высокую термостойкость и возможность использования в качестве высокотемпературной оснастки тепловых агрегатов для получения металлов и сплавов, в том числе для аэрокосмической техники [1].

Для повышения прочностных свойств и термостойкости огнеупорной керамики в ее состав вводят наночастицы и нановолокна тугоплавких материалов. Перспективными армирующими компонентами являются наноразмерные волокна оксида алюминия, стабильные в области высоких температур и оказывающие влияние на фазообразование и кинетику гетерогенных процессов, что, в свою очередь, позволяет регулировать микроструктуру и свойства керамики.

В работе исследованы физико-механические свойства огнеупорной кордиеритовой керамики, модифицированной нановолокнами  $Al_2O_3$ .

Получены образцы огнеупорной кордиеритовой керамики следующего вещественного состава, масс. %: тальк – 36,8, глина огнеупорная – 47,8, глинозем технический – 15,4.

В качестве модифицирующей добавки использовали нановолокна оксида алюминия в виде 2 % водной суспензии, диспергированной ультразвуком. Длина волокон составляет 0,5–1 мкм, диаметр 8–10 нм, таким образом, их аспектное соотношение близко к 100 [2].

Смесь сырьевых компонентов подвергали гомогенизации и измельчению в кольцевой мельнице ROCKLABS. Формование экспериментальных образцов проводили методом полусухого прессования

\* Благодарность. Работа выполнена в рамках программы «Приоритет 2030» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

при давлении 35 МПа, при относительной влажности 10 масс. %. После естественной сушки образцы спекали в муфельной печи при температуре 1250 °С в течение 2 ч.

Анализ фазового состава полученной керамики показывает, что к числу основных фаз можно отнести кордиерит, корунд, кварц и кристобалит. Отмечается, что с ростом концентрации нановолокон оксида алюминия до 1,0 масс. % содержание кордиерита увеличивается от 44,7 до 63,8 масс. %.

В таблице 1 приведены физико-механические свойства экспериментальных образцов модифицированной кордиеритовой огнеупорной керамики.

Таблица 1

**Физико-механические свойства экспериментальных образцов огнеупорной керамики**

Содержание нановолокон Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , масс. %	0	0,6	1,0
Водопоглощение, %	12,0	9,6	9,1
Прочность при сжатии, МПа	100	144	189

В результате исследований установлено, что с увеличением содержания нановолокон оксида алюминия прочность огнеупорной керамики увеличивается от 100 до 189 МПа, а водопоглощение снижается с 12 до 9 %

Таким образом, можно заключить, что модифицирование нановолокнами оксида алюминия приводит к значительному увеличению прочности при сжатии и увеличению выхода фазы кордиерита огнеупорной керамики после спекания.

**Библиографические ссылки**

1. Активация процессов синтеза и спекания композиций муллито-кордиеритового состава на основе природного сырья / Т.В. Вакалова, Т.А. Хабас, В.М. Погребенков, и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. 379–384 с.

2. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Simunin M.M., Dobrosmyslov S.S., Kuular A.A., Molokeev M.S., Volochaev M.N., Khartov S.V., A.S.Voronin. Rheological properties of colloidal suspensions of alumina nanofibers. Journal of Molecular Liquids, 2022, 367, 120385.

**References**

1. Vakalova T.V., Khabas T.A., Pogrebenkov V.M., Biryukov A.A. [Activation of the processes of synthesis and sintering of compositions of mullite-cordierite composition based on natural raw materials] *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2015, p. 379–384. (In Russ.).

2. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Simunin M.M., Dobrosmyslov S.S., Kuular A.A., Molokeev M.S., Volochaev M.N., Khartov S.V., A.S.Voronin. Rheological properties of colloidal suspensions of alumina nanofibers. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 367, 120385.

© Еромасов Р. Г., Васильева М. Н., Симонова Н. С., 2023

УДК 004.896

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОРОБОТОВ: БУДУЩЕЕ РЕМОНТА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М. И. Казина\*, Е. М. Гриценко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: bacssssik@gmail.com

*В данной статье рассматривается актуальность и технологическая значимость компьютерного моделирования и разработок нанороботов для ремонтных работ космических аппаратов в условиях открытого космоса. Обозначаются конкретные виды работ, преимущества использования нанороботов, а также обращается внимание на то, каким образом компьютерное моделирование может помочь в разработке и тестировании данных аппаратов.*

*Ключевые слова: нанороботы, компьютерное моделирование, космические аппараты, технологии, космические миссии, открытый космос.*

## COMPUTER SIMULATION OF NANOROBOTS: THE FUTURE OF SPACECAR REPAIR

M. I. Kazina\*, E. M. Gritsenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: bacssssik@gmail.com

*This article discusses the relevance and technological novelty of computer modeling and development of nanorobots for repairing vehicles in outer space. They identify specific types of work, the advantages of using nanorobots, and also draw attention to how computer modeling can help in the development and testing of these devices.*

*Keywords: nanorobots, computer modeling, spacecraft, technology, space missions, outer space.*

В последние десятилетия космические аппараты стали невероятно важными для исследования космоса и обеспечения коммуникации, навигации и спутниковых услуг на Земле. Однако срок службы космических аппаратов ограничен, и регулярный ремонт и обслуживание являются критически важными задачами для продления их жизни и эффективной работы. Одним из перспективных методов ремонта и обслуживания космических аппаратов является использование нанороботов. Эти микроскопические устройства могут выполнять ремонтные работы на космических аппаратах без необходимости их возвращения на Землю. Компьютерное моделирование играет ключевую роль в разработке и усовершенствовании таких нанороботов. В этой статье мы рассмотрим, как компьютерное моделирование нанороботов открывает новые перспективы в проведении ремонтных работ на космических аппаратах.

Нанороботы представляют собой крайне маленькие машины, спроектированные для выполнения задач на молекулярном или атомарном уровне. Они могут иметь размеры от нанометров до нескольких микрометров [1]. В мире космической технологии, нанороботы представляют собой потенциальное решение для ремонта и обслуживания космических аппаратов, так как они способны маневрировать в открытом космосе и выполнять сложные операции.

В контексте космических аппаратов, нанороботы могут выполнять следующие ремонтные работы:

1. Ремонт поверхности: Нанороботы могут использовать свои маленькие инструменты и аппаратные системы для ремонта поверхности космического аппарата, заполняя трещины, восстанавливая поврежденные слои и устраняя коррозию.

2. Замена компонентов: Нанороботы могут заменять дефектные или устаревшие компоненты на борту космического аппарата, что позволяет увеличить его срок службы и улучшить его производительность.

3. Диагностика: Они также могут выполнять функции диагностики, обнаруживая потенциальные проблемы и отправляя данные на Землю для анализа.

4. Монтаж новых систем: В некоторых случаях, нанороботы могут быть задействованы в монтаже новых научных инструментов или дополнительного оборудования на космическом аппарате. [2-3]

#### Преимущества использования нанороботов

##### 1. Миниатюрность

Нанороботы могут проникать в узкие и труднодоступные места космического аппарата, что делает их идеальными для обслуживания и ремонта. Они могут осуществлять диагностику и ремонт без необходимости разбирать всю конструкцию.

##### 2. Маневренность

Нанороботы могут легко маневрировать в невесомости и вакууме космоса, что позволяет им быстро перемещаться и выполнять задачи в различных точках аппарата.

##### 3. Высокая точность

Использование нанороботов обеспечивает высокую точность и контроль над выполняемыми операциями, что критически важно для предотвращения повреждений космического аппарата [4].

##### 4. Уменьшение рисков

Работа в космическом пространстве всегда сопряжена с рисками. Использование нанороботов может уменьшить риск для астронавтов, так как большая часть ремонтных работ может выполняться автономно нанороботами.

#### Компьютерное моделирование: ключ к разработке нанороботов

Прежде чем нанороботы могут быть разработаны и отправлены в космос, необходимо провести исследования и тестирование на земле. Компьютерное моделирование играет важную роль в этом процессе. Вот несколько способов, как компьютерное моделирование помогает в разработке нанороботов для космических ремонтных работ:

1. Дизайн и оптимизация: С использованием компьютерного моделирования можно создать виртуальные модели нанороботов и их инструментов, чтобы определить наилучший дизайн и параметры для выполнения конкретных задач в космосе. Это позволяет сократить время и ресурсы, затрачиваемые на физическое создание и тестирование прототипов [5].

2. Симуляция окружающей среды: Компьютерное моделирование позволяет симулировать условия в космосе, такие как вакуум, радиацию и микрогравитацию, чтобы оценить, как нанороботы будут вести себя и функционировать в реальных условиях.

3. Тестирование алгоритмов: Нанороботы управляются сложными алгоритмами, и компьютерное моделирование позволяет тестировать и улучшать эти алгоритмы до их реального применения.

4. Оценка производительности: Моделирование может использоваться для прогнозирования производительности нанороботов, включая скорость выполнения работ и точность.

##### 5. Моделирование поведения

Моделирование позволяет определить, как нанороботы будут взаимодействовать с поверхностью космического аппарата, как они будут перемещаться и выполнять ремонтные операции.

##### 6. Тестирование виртуальных миссий

Нанороботы могут быть отправлены на виртуальные миссии, чтобы проверить их производительность и надежность в различных сценариях перед отправкой в реальное космическое пространство.

#### Вызовы и Перспективы

Хотя компьютерное моделирование нанороботов предоставляет много перспектив, оно также сопряжено с рядом вызовов. Одним из них является обеспечение связи с нанороботами в глубоком космосе и обеспечение энергией для их функционирования. Кроме того, безопасность и надежность нанороботов должны быть на высшем уровне. Однако, благодаря компьютерному моделированию, ученые и инженеры могут более эффективно преодолевать эти вызовы и создавать более надежных и эффективных нанороботов.

Одной из перспектив этой технологии является увеличение срока службы космических аппаратов и снижение затрат на их обслуживание и ремонт. Это может значительно повысить эффективность космических миссий и сэкономить ресурсы.

В заключение, компьютерное моделирование нанороботов открывает новые горизонты в ремонте и обслуживании космических аппаратов. Эти миниатюрные чудеса могут увеличить долговечность и

эффективность наших космических технологий, позволяя нам исследовать космос с еще большей продолжительностью, а значит, с еще большей практической пользой.

### Библиографические ссылки

1. Грибачев В. П. Нанороботы и нанодинамические системы. М. : Компоненты и технологии, 2008. № 9.
2. Нанотехнологии и наноматериалы в космонавтике / Новиков Л.С., Воронина Е.Н.// Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ. 2014. № 4 (10). С. 14–23.
3. Mavroidis C., Ferreira A.. Nanorobotics: Current Approaches and Techniques, 2013. P. 467. DOI:10.1007/978-1-4614-2119-1
4. Оуэнс Ф.. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
5. Нанороботы, космические путешествия, метавселенная [Электронный ресурс]. URL: <https://sciencepop.ru/nanoroboty-kosmicheskie-puteshestviya-metavselennaya-krutye-tehnologii-kotorye-uidit-pokolenie-z/> (дата обращения: 03.09.2023).

### References

1. Gribachev V. P. *Nanorobots and nanodynamic systems*. M.: Components and Technologies, 2008. № 9. (In Russ.)
2. Novikov L.S., Voronina E.N. [Nanotechnologies and nanomaterials in astronautics] *Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University*. 2014. No. 4 (10). p. 14–23. (In Russ.)
3. Mavroidis C., Ferreira A.. *Nanorobotics: Current Approaches and Techniques*, 2013. p. 467. DOI:10.1007/978-1-4614-2119-1
4. Offens F.. *Nanotechnology*. Moscow: Tekhnosphere, 2007. – 376 p. (In Russ.)
5. Nanorobots, space travel, metaverse [Electronic resource]. URL: <https://sciencepop.ru/nanoroboty-kosmicheskie-puteshestviya-metavselennaya-krutye-tehnologii-kotorye-uidit-pokolenie-z/> (accessed 09/03/2023). (In Russ.)

© Казина М. И., Гриценко Е. М., 2023

УДК 691.175.5/8

## РЕАЛИЗАЦИЯ RTM-МЕТОДА ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ СИБГУ НОЦ ИКИВТ

Е. С. Карпов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: zheka.karpov.70@mail.ru

*В статье представлена проделанная работа по отработке изготовления композиционных материалов методом RTM на базе института для дальнейшего их использования в научно-исследовательской деятельности, в частности для изучения геометрически-нелинейного изгиба композитных стержней.*

*Ключевые слова: RTM, композит, углерод, смола, стержни.*

## EXPERIMENTAL STUDY OF GEOMETRIC-NONLINEAR BENDING OF THIN COMPOSITE AND HOMOGENEOUS RODS

E. S. Karpov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: zheka.karpov.70@mail.ru

*The article presents the work done to test the production of composite materials using the RTM method on the basis of the institute for their further use in research activities, in particular for studying the geometrically nonlinear bending of composite rods.*

*Keywords: RTM, composite, carbon, resin, rods.*

**Введение.** Ввиду роста популярности использования МКА различными научно-исследовательскими группами, появилась и тенденция к развитию наиболее дешёвых, лёгких и надёжных материалов, но так как космическое пространство накладывает свои ограничения на конструкционные решения, приходится учитывать ряд особенностей: высокие температуры и способы её отведения, перепады давления, вибрационные нагрузки на этапе выведения на орбиту, глубокий вакуум, радиационное воздействие, микрочастицы и другое. Для решения многих производственных и эксплуатационных проблем применение нашли композитные материалы, в частности различные стержневые конструкции, что претерпевают нагрузки продольного и поперечного характера, например: системы развёртывания антенн, солнечных панелей и т.д.

**Метод RTM (Resin Transfer Molding).** Передача связующего методом RTM, представляет собой процесс изготовления композиционного материала, при котором низковязкая смола закачивается в соответствующую форму, содержащую заранее уложенный наполнитель. Смола заполняет форму, смачивая волокна перед отверждением. RTM используется во многих областях для производства высококачественных деталей. Процесс RTM признан экономически эффективной альтернативой ручной выкладке и традиционно используется в аэрокосмической промышленности для изготовления основных и вспомогательных элементов конструкции [1].

**Реализация метода производства.** Были созданы чертежи необходимой литейной формы и переданы на фрезеровочные работы. Во время ожидания была подобрана смола: эпоксидное связующее Т-67 разработано для получения изделий из ПКМ (полимерный композитный материал) методами вакуумной инфузии и RTM. Связующее отличается низкой вязкостью и высокими физико-механическими характеристиками, что обеспечивает возможность получения ПКМ с низкой пористо-

стью и высокой прочностью при эксплуатации до 85°C в влажных условиях [2]. Характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Общие характеристики смолы T-67**

Назначение	Двухкомпонентное связующее разработанное специально для вакуумной инфузии и RTM процессов
Приблизительное время жизни связующего в изделии при 20°C, час. мин.:	Не менее 60 минут при температуре 50°C
Температура стеклования (Tg1 Max), °C:	Отверждение при 120 °C дает температуру стеклования 128 °C
Отвердитель	Поставляется комплектом: смола и отвердитель

После получения изделия, произведена дополнительная герметизация формы. Перед укладкой в форму армирующего материала, как крышка, так и основание литейной матрицы обрабатывались разделительным воском “IZHWAX SU24” данная операция повторялась 4 раза каждая с шагов в 20 минут, чтобы обеспечить лёгкое извлечение композитного стержня после всех литейных операций.



Рис. 1. Аллюминиевая литейная матрица

В качестве армирующего полотна использовалась стеклоткань и углеткань. Нарезка материалов производилась на CO<sub>2</sub> лазере.

После укладки необходимого армирующего материала, форма жёстко крепилась при помощи нескольких рядов болтового соединения, что в совокупности с прорезиненными бортиками основания формы обеспечивало необходимый уровень герметизации литейной матрицы. Уложенная ткань заливалась смолой, форма помещалась в промышленную печь, в которой предварительно достигалась температура 100 градусов Цельсия.

В ходе отладки процесса были получены удовлетворительные по качеству стержни:

- 1) Стеклотканый композитный стержень, выложенный из 4 слоёв стеклоткани, ориентация слоёв (0,0,0,0). Изготовлен без использования жертвенной ткани, имеет излишки смолы;
- 2) Стеклотканый композитный стержень, выложенный из 4 слоёв стеклоткани, ориентация слоёв (0,0,0,0). Изготовлен с использованием жертвенной ткани, не имеет излишков смолы;
- 3) Стеклотканый композитный стержень, выложенный из 4 слоёв стеклоткани, ориентация слоёв (0,0,0,0). Изготовлен с использованием жертвенной ткани, не имеет излишков смолы;
- 4) Углетканый композитный стержень, выложенный из 4 слоёв углеткани, ориентация слоёв (0,0,0,0);
- 5) Углетканый композитный стержень, выложенный из 5 слоёв углеткани, ориентация слоёв (0,0,0,0,0).



Рис. 2. Пример полученного 4х слойного углетканного стержня

**Заключение.** Изучен RTM метод создания композитных материалов. Изучены свойства эпоксидной смолы Т-67, изготовлена алюминиевая литейная форма. После приготовления оборудования и материалов освоена методология производства композитных стержней. После того как процесс изготовления был налажен и отработан, для экспериментального изучения геометрически-нелинейного изгиба тонких композитных и однородных стержней, были получены композитные стержни на основе стеклоткани и углеткани [3].

#### Библиографические ссылки

1. Direct Processes Technology Manual: цифровой ресурс. – URL: [https://vk.com/doc171738278\\_612132163?hash=97b5f9ebb8d8c16726&dl=f5acbb16483847b1f1](https://vk.com/doc171738278_612132163?hash=97b5f9ebb8d8c16726&dl=f5acbb16483847b1f1). – Текст : электронный.
2. Shopnewcomposite.ru: официальный сайт. – URL: <https://shopnewcomposite.ru/item/smola-t-67>. – Текст : электронный.
3. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем : учебное пособие / А. С. Волмир ; Издательство “Наука” главная редакция физико-математической литературы. – Москва : 1967. – Текст : электронный.

#### References

1. Direct Processes Technology Manual: digital resource. – URL: [https://vk.com/doc171738278\\_612132163?hash=97b5f9ebb8d8c16726&dl=f5acbb16483847b1f1](https://vk.com/doc171738278_612132163?hash=97b5f9ebb8d8c16726&dl=f5acbb16483847b1f1). – Text: electronic.
2. Shopnewcomposite.ru: official website. – URL: <https://shopnewcomposite.ru/item/smola-t-67>. – Text: electronic.
3. Volmir, A. S. Stability of deformable systems: textbook / A. S. Volmir; Publishing house “Nauka” is the main editorial office of physical and mathematical literature. – Moscow: 1967. – Text: electronic.

© Карпов Е. С., 2023

УДК 538.911

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ГЕРМАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ $Fe_3Si/Si(111)$ \*

А. А. Кошелев<sup>1</sup>, И. А. Яковлев<sup>2</sup>, С. Н. Варнаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –

обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 38

\*E-mail: vysoczki36@gmail.com

*Исследованы процессы эпитаксиального роста слоя Ge на  $Fe_3Si/Si(111)$ , полученного методом молекулярно-лучевой эпитаксии с последующим отжигом. Установлено, что после отжига при 380 °C аморфная пленка Ge трансформируется в монокристаллические островки.*

*Ключевые слова: тонкие магнитные пленки, силициды железа, дифракция электронов, слоистые структуры, спинтроника, германий.*

## INVESTIGATION OF THE EPITAXIAL GROWTH PROCESSES OF GERMANIUM ON THE $Fe_3Si/Si(111)$ SURFACE

A. A. Koshelev<sup>1\*</sup>, I. A. Yakovlev<sup>2</sup>, S. N. Varnakov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Physics named after L.V. Kirensky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences –

a separate division of the Federal Research Center KSC SB RAS

38 building, 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

\*E-mail: vysoczki36@gmail.com

*The epitaxial growth processes of a Ge layer on  $Fe_3Si/Si(111)$  synthesized by molecular beam epitaxy with subsequent annealing have been studied. It has been established that after annealing at 380 °C the amorphous Ge film is transformed into single-crystalline islands.*

*Keywords: thin magnetic films, iron silicides, electron diffraction, layered structures, spintronics, germanium.*

Современная жизнедеятельность человека, неразрывно связана с использованием множества различных приборов, большая часть из которых работает с применением микроэлектронных чипов (датчики, контроллеры, компьютеры, усилители сигналов). Причем к микросхемам для аэрокосмической техники предъявляются повышенные требования к надежности (как самого рабочего элемента, так и корпуса), устойчивости к вибрации и перегрузкам, влажности, электрическим перегрузкам, расширенный температурный диапазон и множество других. В ходе эволюции микроэлектроники появилось новое поколение технологий – спинтроника, которая основана на квантовых процессах. Большое внимание в развитии микроэлектроники привлекают структуры вида «ферромагнетик/полупроводник», которые объединяют уникальные свойства спинтроники и полупроводниковой электроники. Ферромагнитный силицид  $Fe_3Si$  – твердый расплав железа и кремния – является многообещающим материалом для использования в спиновых транзисторах, устройствах магнитной памяти, потому что сплав Гейслера  $Fe_3Si$  имеет высокую степень поляризации спина электрона на уровне Ферми, предсказанную на основании теоретических расчетов [1,2]. Германий является широкоис-

\* Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания ИФ СО РАН.

пользуемым простым полупроводниковым материалом в современной микроэлектронике, и имеет ряд преимуществ перед тем же кремнием, к примеру, низкое собственное электросопротивление и более высокая подвижность собственных носителей заряда [3]. Таким образом исследование процессов эпитаксиального роста основных элементов сверхтонких слоистых структур является одной из важных задач на пути совершенствования технологии создания микроэлектронных приборов.

Создание исследуемых наноразмерных структур осуществлялось на оборудовании, которое расположено в лаборатории Физики магнитных явлений Института физики им. Л.В. Киренского, методом термического осаждения из эффузионных ячеек в условиях сверхвысокого вакуума на многомодульном комплексе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) «Ангара». Для исследования кристаллической структуры поверхности образцов в камере использовался встроенный в нее дифрактометр отраженных быстрых электронов (ДОБЭ)[4].

Подложка кремния подвергалась многоэтапной химической обработке на воздухе, а после загружалась в вакуумную камеру, и подвергались гибриднему методу отжига с дополнительным напылением сверхтонкого слоя кремния, пока на картине ДОБЭ не формировалась картина от поверхности Si(111) с реконструкцией  $7 \times 7$ . На очищенной поверхности кремния Si(111)  $7 \times 7$  был сформирован слой силицида железа  $\text{Fe}_3\text{Si}$  толщиной 30 нм при комнатной температуре методом МЛЭ при совместном осаждении Fe:Si в атомных пропорциях 3:1 [5]. Далее проводился синтез слоя Ge толщиной 6 нм при комнатной температуре, с последующим отжигом полученного образца при температуре 380 °С в течение 3 часов.

Из анализа данных ДОБЭ [6] было установлено, что при напылении на поверхность  $\text{Fe}_3\text{Si}$  при комнатной температуре, слой германия формируется с аморфной кристаллической структурой, а после отжига при  $T=380$  °С на дифракционной картине (рисунок 1) появляются рефлексы в виде точек, соответствующие островковой монокристаллической структуре пленки.

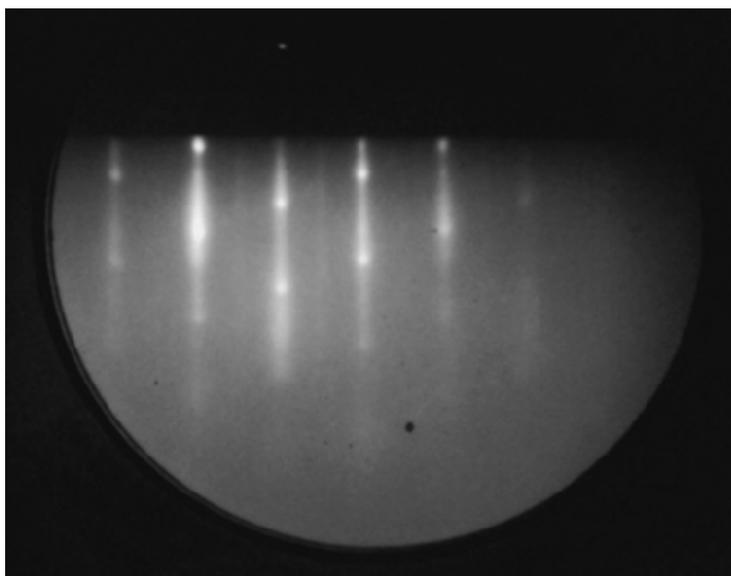


Рисунок 1 – Картина ДОБЭ для полученной структуры Ge/ $\text{Fe}_3\text{Si}$  на подложке кремния Si(111)  $7 \times 7$  после отжига при  $T=380$  °С

Полученные результаты свидетельствует о том, что аморфная пленка полупроводникового германия, сформированная на поверхности гибридной структуры  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$   $7 \times 7$  с последующим отжигом всей структуры при  $T = 380$  °С в течение трех часов, трансформируется в монокристаллические островки, образуя многослойную монокристаллическую структуру «полупроводник-ферромагнетик-полупроводник».

#### Библиографические ссылки

1. Ueda K. et al. Formation of  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}$  Multi-layer by Double Heteroepitaxy on High Quality  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}$  Substrate for Spintronic Application //ECS Transactions. – 2007. – Т. 11. – №. 6. – С. 487.
2. Ikawa M. et al. Influence of the Ge diffusion on the magnetic and structural properties in  $\text{Fe}_3\text{Si}$  and CoFe epilayers grown on Ge //Journal of Crystal Growth. – 2017. – Т. 468. – С. 676-679.

3. Материалы для производства изделий электронной техники: Учеб. пособие для СПТУ/ Г. Н. Кадькова, Г.С. Фонарев, В.Д. Хвостикова и др. – М: Высш. шк., 1987. – 247 с.
4. Яковлев И. А. Получение, структура и магнитные свойства тонкопленочных силицидов железа // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – 2014. – С. 1-139.
5. Yakovlev I. A. et al. Study of the structural and magnetic characteristics of epitaxial Fe<sub>3</sub>Si/Si (111) films //JETP letters. – 2014. – Т. 99. – С. 527-530.
6. Хейденрайх, Р. Основы просвечивающей электронной микроскопии : перевод с английского / Р. Хейденрайх; под ред. Е.С. Куранского. – М.: МИР, 1966. – 471 с.

### References

1. Ueda K. et al. Formation of Fe<sub>3</sub>Si/Ge/Fe<sub>3</sub>Si Multi-layer by Double Heteroepitaxy on High Quality Fe<sub>3</sub>Si/Ge Substrate for Spintronic Application //ECS Transactions. – 2007. – Т. 11. – №. 6. – С. 487.
2. Ikawa M. et al. Influence of the Ge diffusion on the magnetic and structural properties in Fe<sub>3</sub>Si and CoFe epilayers grown on Ge //Journal of Crystal Growth. – 2017. – Т. 468. – С. 676-679.
3. Materialy dlya proizvodstva izdelii elektronnoi tekhniki: Ucheb. posobie dlya SPTU [Materials for the production of electronic products: Textbook for vocational technical schools]/ G. N. Kadykova, G.S. Fona-arev, V.D. Khvostikovai dr. – М: Vyssh. shk., 1987. – 247 s.
4. Yakovlev I. A. Poluchenie, struktura i magnitnye svoistva tonkoplennykh silitsidov zheleza [Preparation, structure and magnetic properties of thin-film iron silicides] // Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. [Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences] – 2014. – С. 1-139.
5. Yakovlev I. A. et al. Study of the structural and magnetic characteristics of epitaxial Fe<sub>3</sub>Si/Si (111) films //JETP letters. – 2014. – Т. 99. – С. 527-530.
6. Kheidenraikh, R. Osnovy prosvchivayushchei elektronnoi mikroskopii :perevod s angliiskogo [Basics of Transmission Electronics: translation from English] / R. Kheidenraikh; pod red. E.S. Kuranskogo. – М.: MIR, 1966. – 471 s.

© Кошелев А. А., Яковлев И. А., Варнаков С. Н., 2023

УДК 666.3-16

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОВОЛОКНАМИ $Al_2O_3$ НА СВОЙСТВА КЕРАМИКИ ИЗ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА\*

Е. Ю. Подшибякина<sup>1</sup>, А. Ф. Шиманский<sup>1</sup>, М. Н. Васильева<sup>1</sup>, П. О. Юрьев<sup>1</sup>, А. Н. Городищева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

E-mail: podshibyakina.elenka@mail.ru

*Изучено влияние модифицирования нановолокнами  $Al_2O_3$  на свойства кварцевой керамики, полученной методом шликерного литья. Установлено, что добавка нановолокон в интервале от 0,05 до 0,15 масс. % приводит к увеличению прочности керамики на сжатие от 90 до 145 МПа.*

*Ключевые слова: плавленный кварц, шликерное литье, наномодифицированная кварцевая керамика.*

## INFLUENCE OF $Al_2O_3$ NANOFIBERS MODIFIED ON THE PROPERTIES OF FUSED QUARTZ CERAMICS

E. Yu. Podshibyakina<sup>1</sup>, A. F. Shimansky<sup>1</sup>, M.N. Vasilyeva<sup>1</sup>, P.O. Yuriev<sup>1</sup>, A.N. Gorodishcheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University

79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: podshibyakina.elenka@mail.ru

*The effect of modification with  $Al_2O_3$  nanofibers on the properties of quartz ceramics obtained by slip casting has been studied. It was found that the addition of nanofibers in the range from 0.05 to 0.15 wt. % leads to an increase in the compressive strength of ceramics from 90 to 145 MPa.*

*Key words: fused quartz, slip casting, nanomodified quartz ceramics.*

Широкий спектр применений конструкционной кварцевой керамики включает аэрокосмическую отрасль, где она используется для изготовления радиопрозрачных элементов летательных аппаратов и ракетно-космической техники [1], так как имеет необходимые для этого эксплуатационные характеристики, включая огнеупорность, термостойкость и высокую прочность.

Целью работы явилось исследование влияния нановолокон оксида алюминия на механическую прочность кварцевой керамики, полученной методом шликерного литья в гипсовую форму.

В качестве сырья для получения экспериментальных образцов керамики методом шликерного литья в гипсовую форму использовали порошок плавленного кварца с концентрацией примесей ~ 0,05 масс. %. Для повышения механических свойств керамики в керамическую массу добавляли нановолокна  $Al_2O_3$ . Длина волокон составляет 0,5–1 мкм, диаметр 8–10 нм.

Получены экспериментальные образцы керамики, содержащие от 0,05 до 0,15 масс. % нановолокон  $Al_2O_3$ . На рисунке приведена фотография микроструктуры керамического материала с добавкой нановолокон после предварительного обжига при температуре 800 °С, демонстрирующая равномерное распределение нанодобавки в объеме керамики. Из приведенных данных следует, что волокна агрегированны с субмикронными частицами в составе твердой фазы и преимущественно находятся на межзеренных границах.

\* Работа выполнена в рамках программы «Приоритет 2030» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

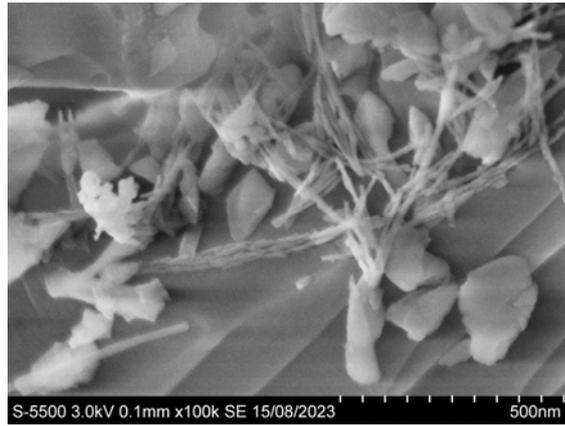


Рис. Распределение нановолокон в керамическом материале,  $\times 10^4$

Установлено, что наличие волокон  $Al_2O_3$  на границах раздела проявляется на стадии спекания и приводит к возрастанию усадки от 0,8 до 1,2 % при температуре 1200 °С, как следствие увеличивается плотность и прочность наномодифицированного керамического материала. Результаты испытаний образцов керамики на прочность приведены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний образцов керамики на прочность

Концентрация нановолокон, масс. %	$\sigma_{сж}$ , МПа
0	90,0
0,05	125,0
0,1	140,0
0,15	145,0

Таким образом, в технологии кварцевых керамических материалов и изделий из них целесообразно использовать добавку нановолокон  $Al_2O_3$  для повышения механической прочности.

#### Библиографическая ссылка

1. Михеев, С.В. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике / С.В. Михеев, Г.Б. Строганов, А.Г. Ромашин. – М.: Альтекс. -2002 – 276 с.

#### Reference

1. Mikheev, S.V. Ceramic and composite materials in aviation technology / S.V. Mikheev, G.B. Stroganov, A.G. Romashin. – M.: Altex. -2002 – 276 p.

© Подшибякина Е. Ю., Шиманский А. Ф.,  
Васильева М. Н., Юрьев П. О., Городищева А. Н., 2023

УДК 629.7

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К. Е. Полукчу<sup>1</sup>, Л. Е. Корепанов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1

\*E-mail: korepanova@mail.sibsau.ru

*Аддитивные технологии – один из видов перспективных направлений развития предприятий, активно развивающиеся во всем мире в том числе и в России. В развитии заинтересованы отрасли предприятия, связанные с высокоточными изделиями, например, такие как авиакосмическая отрасль, автомобиле- и машиностроение, а также медицина в части протезирования.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, особенности 3D печати, перспективы производства, оптимизация производств.*

## APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE AEROSPACE INDUSTRY

K. E. Polukchu<sup>1</sup>, L. E. Korepanov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov  
1, 1st Krasnoarmeyskaya str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation

\*E-mail: korepanova@mail.sibsau.ru

*Additive technologies are one of the types of promising areas for the development of enterprises that are actively developing all over the world, including in Russia. Enterprises related to high-precision products, for example, such as the aerospace industry, automotive and mechanical engineering, as well as medicine in terms of prosthetics, are interested in the development.*

*Keywords: additive technologies, features of 3D printing, production prospects, optimization of production.*

Технологический процесс не стоит на месте, с каждым днем происходит совершенствование цифровых технологий, что позволяет использовать новшества на предприятиях, одним из которых являются аддитивные технологии производства изделий – на сегодняшний день это один из самых передовых и востребованных во всем мире способов производства изделий [2].

Аддитивные технологии – это послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3d технологий. Среди применений аддитивных технологий наиболее востребовано производство функциональных изделий для нужд заинтересованных отраслей промышленности таких как авиакосмическая отрасль, автомобиле- и машиностроение, медицина в части протезирования, то есть там, где существует острая потребность в изготовлении высокоточных изделий и их прототипов в кратчайшие сроки. Этот метод производства имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами (рис. 1), такими как литье или обработка материалов. [1].

Одно из главных преимуществ аддитивных технологий – возможность создания сложных геометрических форм и структур, которые трудно или невозможно получить другими способами. Это открывает новые возможности для дизайна и инноваций в различных отраслях, таких как медицина, авиация, автомобильная промышленность и т. д. Так же можно отметить экономический фактор, то есть стоимость изделия, а также возможность использования нетрадиционных материалов, которые не могут быть применены в классической схеме производства [3].



Рис. 1. Схема традиционного и аддитивного производства.

Из рисунка 1 видно, что цепочка аддитивного производства намного меньше чем традиционная схема, что делает его выгоднее и эффективнее. Классическое производство включает в себя два способа создания изделия – это литье, либо механическая обработка заготовки, оба этих способа не могут заменить друг друга, что делает их невыгодными и мало эффективными. В то время как 3D печать может выполнять все те же функции, с меньшими материальными и временными затратами. Наиболее распространенные методы 3D печати:

1. FDM (Fused Deposition Modeling) – послойное построение изделия из расплавленной пластиковой нити.
2. SLM (Selective Laser Melting) – селективное лазерное сплавление металлических порошков.
3. SLS (Selective Laser Sintering) – селективное лазерное спекание полимерных порошков.
4. SLA (Stereolithography) – лазерная стереолитография, отверждение жидкого фотополимерного материала под действием лазера.
5. DMD (Direct Metal Deposition) – прямое или непосредственное осаждение (материала), то есть непосредственно в точку, куда подводится энергия, и где происходит в данный момент построение фрагмента детали.

На сегодняшний день российский рынок аддитивных технологий слабо развит в отличии от иностранных государств, но является перспективным направлением промышленности. При сегодняшнем уровне развития аддитивные технологии, предприятия, использующие 3D печать можно отнести к единичному или серийному, но не как не к массовому производству. Рынок аддитивных технологий складывается из сегментов оборудования, материалов, услуг и программного обеспечения:

- Оборудование для 3D-печати – серийное изготовление станков и комплектующих;
- Материалы для 3D-печати – универсальные порошки, в том числе для ответственных изделий;
- Программное обеспечение для 3D-печати – единая цифровая платформа для разработки и производства;
- Услуги 3D-печати – комплексное предложение по аутсорсингу изделий.

Сегментация рынка аддитивных технологий в России происходит в соответствии с мировыми трендами. В наибольшей степени аддитивные технологии внедряются в авиакосмическую и автомобильную отрасли, по данным Минпромторга РФ, на авиакосмическую отрасль приходится порядка 30% [4] всего производства (рис. 2).

Аддитивные технологии производства, такие как 3D-печать, имеют огромный потенциал в авиакосмической отрасли. Они позволяют создавать сложные и точные детали, которые ранее были сложны или невозможны для производства традиционными методами. Одним из ярких примером применения аддитивных технологий в авиакосмической области является предприятие НПО «Энергомаш», дочерняя структура корпорации «Роскосмос». Первым масштабным проектом с применением аддитивных технологий НПО «Энергомаш» являются успешные огневые испытания камеры сгорания двигателя РД-0124 применяемого на ракетах-носителях «Союз-2.1б». Помимо аддитивного производства камер сгорания опробована 3D-печать смесительной головки: если изготовленная традиционными методами головка состоит из 220 деталей со 124 паяными соединениями и 62 сварочными швами,

то 3D-печатный аналог можно изготовить целиком, а на выращивание детали уходит всего 77 часов. Полученный опыт показывает, что с применением 3D-принтеров трудоемкость производства двигателя снижается примерно на 20% [5].



Рис. 2. Сегментация рынка аддитивных технологий в РФ

Подводя итог всему сказанному выше, можно отметить что использование аддитивных технологий является перспективным выбором направления развития предприятия, которое позволит уменьшить денежные затраты, а также трудоёмкость процесса производства. Перед замещением традиционной схемы на 3D печати необходимо тщательно проанализировать процесс производства изделия, так как при сегодняшнем уровне развития, аддитивная технология все еще имеет множество недостатков, одним из которых является объём выпускаемой продукции.

#### Библиографические ссылки

1. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина // Изд-во политехнического университета Санкт-Петербург, 2013. 210 с.
2. Сколков статья про аддитивные технологии [Электронный ресурс]. URL: [https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-\\_1320\\_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx](https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-_1320_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx)
3. Сообщество владельцев 3D принтеров «3DToday» [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tehnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnyx-tehnologii-v-proizvodstvo>
4. Официальный сайт Минпромторга РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://minpromtorg.gov.ru/>
5. Официальный сайт корпорации «Роскосмос» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/>

#### References

1. Additive technologies in mechanical engineering / M.A. Zlenko, A.A. Popovich, I.N. Mutyulina // Publishing house of the Polytechnic University of St. Petersburg, 2013. 210 p.
2. Skolkov article about additive technologies [Electronic resource]. URL: [https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-\\_1320\\_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx](https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-_1320_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx)
3. Community of 3D printer owners “3DToday” [Electronic resource]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tehnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnyx-tehnologii-v-proizvodstvo>
4. Official website of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation [Electronic resource]. URL: <https://minpromtorg.gov.ru/>
5. Official website of the Roscosmos corporation [Electronic resource]. URL: <https://www.roscosmos.ru/>

УДК 539.21:537.86

## ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ И ИМПЕДАНС В ПОЛУПРОВОДНИКАХ $Sm_xMn_{1-x}S^*$

Р. В. Рунов\*, А. В. Гельгорн

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: runchik03@mail.ru

*Исследуются динамические характеристики полупроводников на основе  $Sm_xMn_{1-x}S$  методом импедансной спектроскопии в интервале частот  $10^2 - 10^6$  Гц, ИК спектроскопии в области температур 80 – 500 К. Найдено время релаксации носителей тока и ее зависимость от температуры из частотной зависимости импеданса.*

*Ключевые слова: полупроводники, импеданс, время релаксации, модель Дебая.*

## RELAXATION TIME AND IMPEDANCE IN $Sm_xMn_{1-x}S$ SEMICONDUCTORS

R. V. Runov\*, A. V. Gelgorn

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: runchik03@mail.ru

*The dynamic characteristics of semiconductors based on  $Sm_xMn_{1-x}S$  are studied using impedance spectroscopy in the frequency range  $10^2 - 10^6$  Hz, IR spectroscopy in the temperature range 80 – 500 K. The relaxation time of current carriers and its dependence on temperature are found from the frequency dependence of the impedance.*

*Keywords: semiconductors, impedance, relaxation time, Debye model.*

Полупроводники, в которых наблюдается магнитоэлектрические эффекты, могут быть использованы в качестве составляющих компонент сенсорной техники, термоэлектрических источников энергии, магнитной памяти и для создания охлаждающих устройств [1].

Время релаксации носителей тока найдем из частотной зависимости импеданса. Импеданс, активная и реактивная части импеданса измерены на анализаторе компонентов АМ–3028 в частотном интервале  $\omega = 10^2 - 10^6$  Гц при температурах 80 – 400 К, амплитуда переменного напряжения составляла 1 В [2]. Для расчета спектров импеданса применялось программное обеспечение ZView (Scribner Associates Inc.). Частотные зависимости импеданса представлены на рис. 1а.

Компоненты импеданса хорошо описываются в модели Дебая [3]:

$$\operatorname{Re} Z(\omega) = \frac{A}{1 + (\omega\tau)^2}; \operatorname{Im} Z(\omega) = \frac{B\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1)$$

где  $\tau$  – время релаксации носителей тока, А и В параметры.

Время релаксации уменьшается в области температур 80 – 100 К и имеет минимум при 100 К, где проводимость обнаруживает скачок. Наибольшие изменения времени релаксации наблюдаются в области магнитного фазового перехода в результате взаимодействия носителей заряда с магнитной подсистемой и в окрестности структурного перехода за счет взаимодействия с упругой подсистемой. Время релаксации выше 240 К слабо меняется при нагревании, имеет небольшой минимум при 375 К (рис. 2b).

Годограф импеданса описывается в модели эквивалентных схем с параллельным соединением емкости и резистора, то есть время релаксации носителей заряда связана с эффективным образованием емкостного заряда за время  $\tau = RC$  [4].

\* Работа поддержана Российским научным фондом, Правительством Красноярского края и проектом Красноярского научного фонда № 23-22-10016.

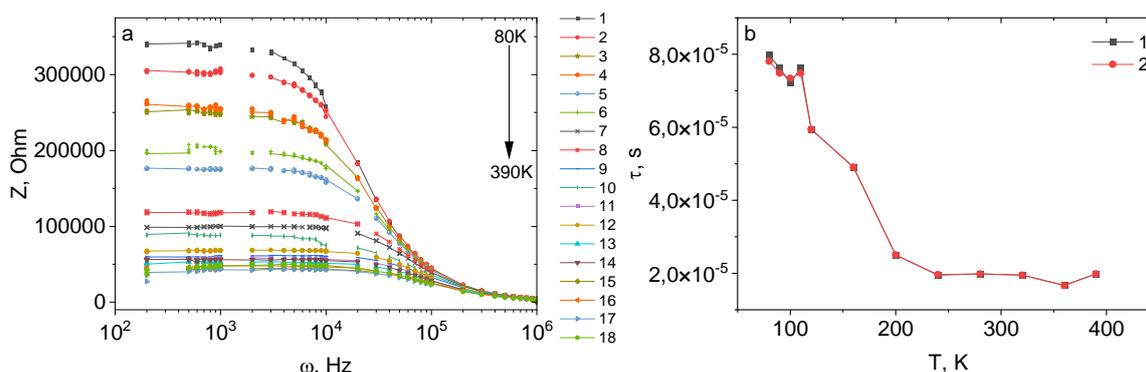


Рис. 1. Частотная зависимость импеданса  $Z$  (а) для образца  $\text{Sm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $x = 0.1$  без поля  $H = 0$  (1,3,5,7,9,11,13,15,17) и в магнитном поле  $H = 12$  кЭ (2,4,6,8,10,12,14,16,18) при температурах  $T = 80\text{K}$  (1,2),  $120\text{K}$  (3,4),  $160\text{K}$  (5,6),  $200\text{K}$  (7,8),  $240\text{K}$  (9,10),  $280\text{K}$  (11,12),  $320\text{K}$  (13,14),  $360\text{K}$  (15,16),  $390\text{K}$  (17,18). Температурная зависимость времени релаксации  $\tau$  без поля  $H = 0$  (1) и в магнитном поле  $H = 12$  кЭ (2) (б)

Влияние магнитного поля на динамические характеристики носителей тока исследовалось в результате измерения компонент импеданса в магнитном поле при фиксированных температурах. Из спектра импеданса найдено время релаксации носителей заряда и его резкое уменьшение при переходе из антиферромагнитного состояния в парамагнитное [5].

#### Библиографические ссылки

1. Effect of the electrical inhomogeneity on the magnetocapacitance sign change in the  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  semiconductors upon temperature and frequency variation / S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, et.al. // *J. Mater. Sci.: Mater. in Electr.*, 2023. V. 34. P. 284.
2. Magnetoimpedance, Jahn-Teller transitions upon electron doping of manganese sulfide / S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, et.al. // *JMMM.*, 2020. V. 513. P. 167104.
3. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution / S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, et.al. // *Phys. Status Solidi B*. 2019. V. 259. P. 1900043.
4. Electrical resistance and impedance of manganese sulfides, substituted by lutetium / A.M. Kharkov, M.N. Sitnikov, O.B. Begisheva, et.al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1181. P. 012006.
5. Magnetoresistance and Electric Polarization in the  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  Compound / S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, et.al. // *Phys. Status Solidi B*. 2022. V. 259. P. 2100555.

#### References

1. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., et.al. [Effect of the electrical inhomogeneity on the magnetocapacitance sign change in the  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  semiconductors upon temperature and frequency variation]. *J. Mater. Sci.: Mater. in Electr.*, 2023, Vol. 34, P. 284.
2. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., et.al. [Magnetoimpedance, Jahn-Teller transitions upon electron doping of manganese sulfide]. *JMMM.*, 2020, Vol. 513, P. 167104.
3. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., et.al. [Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution]. *Phys. Status Solidi B*, 2019, Vol. 256, P. 1900043.
4. Kharkov A.M., Sitnikov M.N., Begisheva O.B., et.al. [Electrical resistance and impedance of manganese sulfides, substituted by lutetium]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, Vol. 1181, P. 012006.
5. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., et.al. [Magnetoresistance and Electric Polarization in the  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  Compound]. *Phys. Status Solidi B*, 2022, Vol. 259, P. 2100555.

УДК 621.01

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО  
НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ\***

О. В. Семенуха<sup>1,2</sup>, С. Ю. Воронина<sup>2</sup>, С. А. Фесик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\* E-mail: semenukha.cool@mail.ru

*В качестве датчиков деформации для измерения состояния и положения рефлектора могут быть востребованы гибкие тензорезистивные элементы из нанокomпозиционного материала. Применение гибридного наполнителя позволило значительно увеличить коэффициент тензорезистивности образцов полимерного композиционного материала (ПКМ).*

*Ключевые слова: ПКМ, модификатор поверхности, тканевый наполнитель, электропроводность, углеродные нанотрубки, углеродный волокнистый наполнитель.*

**POSSIBILITY OF APPLYING STRAIN-SENSITIVE NANOCOMPOSITE  
FOR MONITORING THE STATE OF TRANSFORMABLE STRUCTURES**

O. V. Semenukha<sup>1,2</sup>, S. Yu. Voronina<sup>2</sup>, S. A. Fesik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: semenukha.cool@mail.ru

*Flexible strain-resistive elements made of nanocomposite material can be used as strain sensors to measure the state and position of the reflector. The use of a hybrid filler has made it possible to significantly increase the coefficient of strain resistance of polymer composite material (PCM) samples.*

*Keywords: polymer composite material, surface modifier, fabric filler, electrical conductivity, carbon nanotubes, carbon fiber filler.*

Современные тенденции развития космических систем связи, навигации, радиолокации, астрономии привели к необходимости создания развертываемых в космосе крупногабаритных космических антенн. По мере развития таких конструкций увеличивается интерес в усовершенствовании изготовления и укладки радиоотражающей поверхности в транспортировочном положении трансформируемого рефлектора с разной апертурой. При выборе материала для изготовления сегментов рефлектора, обладающего гибкой поверхностью, обращает на себя внимание композиционный материал, на основе эластичного связующего – полиметилдисилоксана (ПДМС). Наиболее важными требованиями являются: стабильность физико-механических свойств материала при большом перепаде температур от

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Интеллектуальные материалы и структуры» проекта «Разработка многофункциональных интеллектуальных материалов и структур на основе модифицированных полимерных композиционных материалов способных функционировать в экстремальных условиях» (Номер темы FEFE-2020-0015).

-150 °С до + 150 °С, оптическая прозрачность в любой полосе частот, возможность упругого деформирования материала без разрушения для обеспечения раскрытия космических антенн.

Данные о состоянии и положении рефлектора собираются с помощью сенсорных систем, смонтированных на элементах конструкции. Контроль механических нагрузок на элементы конструкции может осуществляться датчиками деформации. Для того, чтобы измерить с помощью тензометрического датчика деформацию, напряжение или усилие используют явление влияния упругой деформации проволоки или полупроводникового стержня на сопротивление материала датчика [1]. Однако качество крепления датчиков, наличие высокого уровня шума и вибрации во время полета, дополнительный вес прикрепляемых датчиков делают сенсорную систему крайне ненадежной. В связи с этим возникает задача создания элементов конструкции с внедренными в материал датчиками деформации, реагирующих на малейшие деформации, такие как растяжения, которые могут привести к снижению радиотехнических характеристик.

Целью данной работы является разработка тензочувствительного нанокompозиционного материала для мониторинга состояния трансформируемых конструкций с уровнем коэффициента тензорезистивности (К) не менее 10.

На чувствительность нанокompозиционного материала оказывает влияние метод диспергирования наполнителя в полимерной матрице, это свидетельствует о том, что при помощи данного фактора можно изменять физико–механические, теплофизические, оптические, электромагнитные и другие эксплуатационные характеристики нанокompозиционного материала. Правильно подобранный способ введения способствует равномерному распределению нанотрубок по объему полимерной матрицы, улучшению их смачивания и адгезии и, соответственно, улучшению характеристик нанокompозиционного материала [2].

В данном исследовании использовались образцы нанокompозиционного материала, состоящие из ПДМС, стеклоткани Т-53, карбида кремния (SiC) фракция F1200 и Matrix 603 – это концентрат УНТ с содержанием 10 % УНТ от общего состава концентрата. Стеклоткань предварительно была обработана раствором АПТЭС в хлороформе для обеспечения повышенной адгезии ПДМС к волокнистому наполнителю. Для придания материалу электропроводящих свойств в матрицу вводился наполнитель Matrix. В качестве перемешивающего агента (для дополнительного размалывания УНТ и предотвращения их агломерации) вводился SiC. SiC был обработан по технологии, описанной в публикации [3]. Содержание SiC варьировалось от 1 до 10 %.

Таким образом в матрицу помещали гибридный наполнитель из Matrix и SiC и разработана технология его введения, этапами которой являлись: ультразвуковое диспергирование; механическое диспергирование; дегазация воздуха из смеси. Образцы нанокompозита изготавливались методом пропитки (вакуумной инфузии) стеклоткани смесью, состоящей из ПДМС и гибридного наполнителя в форму с последующим отверждением в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 30 минут. Микроскопия образцов нанокompозиционного материала представлена на рис. 1.

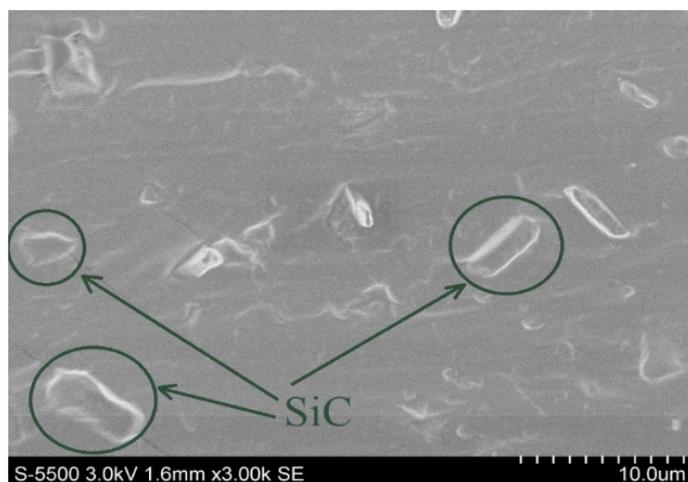


Рис. 1. Микроскопия образцов нанокompозиционного материала с гибридным наполнителем

Максимальное значение  $K$  наблюдалось при растяжении 0,05%. У образцов нанокomпозиционного материала с содержанием SiC 1, 5 и 10 % в составе гибридного наполнителя уровень тензочувствительности материала зафиксирован 38, 40 и 40 соответственно. Значение  $K$  у образцов нанокomпозиционного материала с содержанием гибридного наполнителя SiC 1, 5, 10 % при максимальном растяжении составило 19, 21 и 22 соответственно.

#### Библиографические ссылки

1. Ханин, М. В. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов / М.В. Ханин, Г.П. Зайцев. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
2. Чеботарева Е. А., Вишняков Л. Р. Полимерные композиционные материалы: формирование структуры и влияние её на свойства (Обзор) // Вісник Інженерної академії України. 2012. №. 2. С. 157-163.
3. A method for modifying the surface of silicon carbide with a controlled number of functional groups on surface / M. Yu. Flerko, S. Yu. Voronina, D. V. Antishin [et al.] // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 7, No. 4. P. 281-289

#### References

1. Hanin, M. V. Iznashivanie i razrushenie polimernyh kompozicionnyh materialov / M.V. Hanin, G.P. Zajcev. – M.: Himiya, 1990. – 256 с.
2. Chebotareva E. A., Vishnyakov L. R. Polimernye kompozicionnye materialy: formirovanie struktury i vliyanie eyo na svojstva (Obzor) // Visnik Inzhenernoї akademii Ukraїni. 2012. №. 2. S. 157-163.
3. A method for modifying the surface of silicon carbide with a controlled number of functional groups on surface / M. Yu. Flerko, S. Yu. Voronina, D. V. Antishin [et al.] // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 7, No. 4. P. 281-289. – DOI 10.17277/jamt.2022. 04.pp. 281-289.

© Семенуха О. В., Воронина С. Ю., Фесик С. А., 2023

УДК 538.975

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПЛЕНОК В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ\*

А. С. Теплинская<sup>1\*\*</sup>, А. С. Федоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup>Институт Физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, здание 38

\*\*E-mail: Anastasiateplinskaia@gmail.com

*В космической области востребованы устройства на основе тонких пленок металлов: покрытия, микроволновые резонаторы, фильтры и т.д., для которых определяющее значение имеет диэлектрическая проницаемость при различных частотах.*

*Ключевые слова: тонкие пленки, диэлектрическая проницаемость, DFT.*

## THEORETICAL STUDY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF METAL NANOFILMS IN A WIDE FREQUENCY RANGE

A. S. Teplinskaia<sup>1\*\*</sup>, A. S. Fedorov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

38, building, 50, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

\*\*E-mail: Anastasiateplinskaia@gmail.com

*In the space field devices based on thin films of metals are in demand: coatings, microwave resonators, filters, etc., for which the dielectric constant at different frequencies is of decisive importance.*

*Keywords: thin films, dielectric permittivity, DFT.*

Данная работа посвящена теоретическому исследованию диэлектрической проницаемости тонких пленок благородных металлов в широком частотном диапазоне от 0 до 6 эВ. Из экспериментальных исследований [1,2] известно, что при приближении размеров материала к 10 нм влияние поверхности вносит существенный вклад в оптические свойства, а именно в отражение и пропускание света наночастиц и нанопленок благородных металлов, однако изменение диэлектрической проницаемости в данном случае оставалось неясным.

Особые оптические свойства металлических нанопленок позволяют использовать их в космической области для таких устройств, как оптические покрытия, микроволновые резонаторы, фильтры и т.д. Также сейчас прикладываются огромные усилия по созданию наноустройств из благородных металлов, работающих в ТГц диапазоне частот, для которых необходимо знание диэлектрической проницаемости металлических нанопленок. Равным образом знание корректного тензора диэлектрической проницаемости открывает возможности для создания плазмонных устройств и электромагнитных метаматериалов [3].

Для решения поставленной задачи по определению диэлектрической проницаемости тонких нанопленок был использован квантово-химический метод из первых принципов на основе Теории Функционала Плотности (Density Functional Theory, DFT), реализованный в программе Vienna ab Initio Simulation Program (VASP V6.4) [4].

---

\* Данное исследование было поддержано Российским научным фондом, Соглашение № 23-12-20007, а также Правительством Красноярского края и Красноярским краевым фондом поддержки научной и научно-технической деятельности, Соглашение № 256.

Для последующего исследования были созданы модели тонких пленок золота и серебра толщиной 3-5нм, произведена процедура релаксации суперъячеек и далее проведен расчет действительной и мнимой части тензора диэлектрической проницаемости по трем направлениям (100), (110), (111) вдоль и перпендикулярно поверхности пленок.

Диэлектрическая проницаемость рассчитывалась путем вычисления прямых электронных переходов между занятыми и незанятыми электронными состояниями. Следующее уравнение выражает мнимую часть межзонных вкладов, из которой далее с помощью соотношений Крамерса-Кронига можно вычислить действительную часть:

$$Im[\varepsilon_{x_1x_2}(\omega)] = \frac{8\pi^2 e^2}{V} \lim_{q \rightarrow 0} \frac{1}{q^2} \sum_{m,n} 2f_{nk} \langle u_{m,k+qx_1} | u_{n,k} \rangle \langle u_{n,k} | u_{m,k+qx_2} \rangle \times [\delta(\xi_{m,k+q} - \xi_{n,k} + \hbar\omega) - \delta(\xi_{m,k+q} - \xi_{n,k} - \hbar\omega)]$$

где  $x_1x_2$  – различные декартовы направления,  $\xi$  принадлежит двум различным энергетическим зонам  $m$  и  $n$  для данной  $k$ -точки в первой зоне Бриллюэна, величина  $u_{n,k}$  представляет собой компонент волновой функции Блоха,  $V$  – объем моделируемой элементарной ячейки, а  $f_{nk}$  соответствует числу заполнения.

Отдельно рассчитывался внутризонный вклад Друде электронных переходов [5], зависящий от эффективной массы носителей заряда  $m^*$  и среднего времени рассеивания  $\tau$ , как показано в следующей формуле для мнимой части:

$$Im[\varepsilon(\omega)] = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi n_0 e^2}{m^*}$$

В результате работы были получены значения мнимой части диэлектрической проницаемости, представленные на рис. 1 и рис. 2. На графиках видно, что форма кривой отличается для перпендикулярного и параллельного поверхности направления, а также существенно отличается от значений для кристаллического золота.

Далее была создана аппроксимационная модель для описания действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в виде комбинации значений для  $n$  пластин:

$$\tilde{\varepsilon}(\hbar, \omega) = \varepsilon_{bulk}(\omega) + \sum_n^3 \left( \frac{\alpha_n}{\hbar} \varepsilon_n(\omega) + \frac{\beta_n}{\hbar^2} \varepsilon_n(\omega) \right)$$

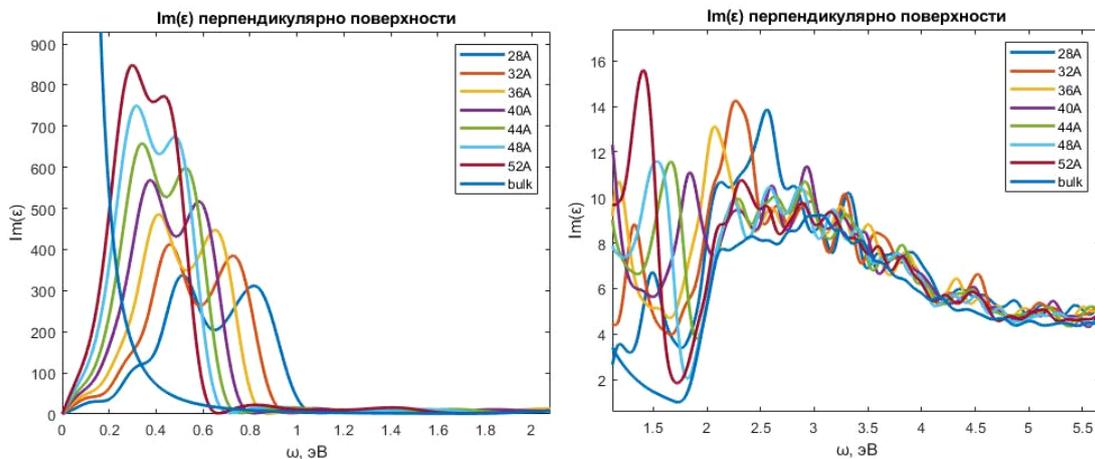


Рис. 1. Мнимая часть диэлектрической проницаемости нанопленок золота толщиной 28-52Å и кристаллического золота в направлении (100) перпендикулярно поверхности

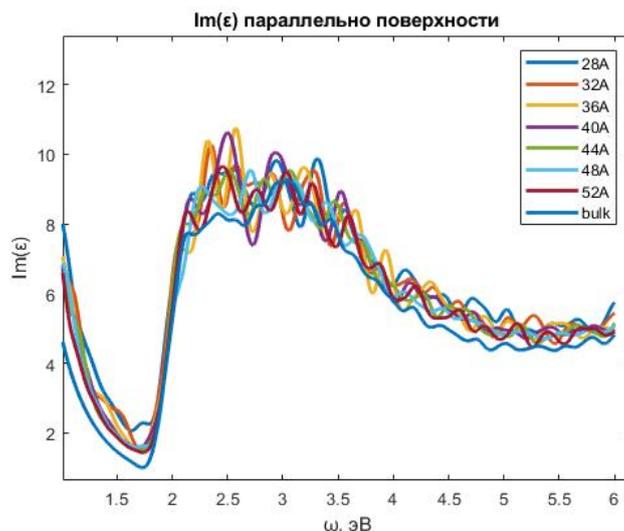


Рис. 2. Мнимая часть диэлектрической проницаемости нанопленок золота толщиной 28-52Å и кристаллического золота в направлении (100) параллельно поверхности

Полученные в результате расчетов данные были использованы для построения аппроксимационной модели, описывающей тензор диэлектрической проницаемости для различных толщин нанопленок металлов в широком диапазоне частот от 0 до 6 эВ.

#### Библиографические ссылки

1. Spectroscopy and nonlinear microscopy of gold nanoparticle arrays on gold films / Hohenau A. et al. // *Physical Review B*. – 2007. – Т. 75. – №. 8. – С. 085104.
2. Enhanced optical transmission of a continuous metal film with double metal cylinder arrays / Liu Z. et al. // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2013. – Т. 25. – №. 12. – С. 1157-1160.
3. Климов В. В. Наноплазмоника. – Общество с ограниченной ответственностью Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2009. – С. 1-480.
4. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set // *Computational materials science*. – 1996. – Т. 6. – №. 1. – С. 15-50.
5. Size-dependent permittivity and intrinsic optical anisotropy of nanometric gold thin films: a density functional theory study / Laref S. et al. // *Optics express*. – 2013. – Т. 21. – №. 10. – С. 11827-11838.

#### References

1. Hohenau A. et al. Spectroscopy and nonlinear microscopy of gold nanoparticle arrays on gold films // *Physical Review B*. – 2007. – Т. 75. – №. 8. – С. 085104.
2. Liu Z. et al. Enhanced optical transmission of a continuous metal film with double metal cylinder arrays // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2013. – Т. 25. – №. 12. – С. 1157-1160.
3. Klimov V. V. Nanoplazmonika. – Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", 2009. – S. 1-480 23 (In Russ.).
4. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set // *Computational materials science*. – 1996. – Т. 6. – №. 1. – С. 15-50.
5. Size-dependent permittivity and intrinsic optical anisotropy of nanometric gold thin films: a density functional theory study / Laref S. et al. // *Optics express*. – 2013. – Т. 21. – №. 10. – С. 11827-11838

© Теплинская А. С., Федоров А. С., 2023

УДК 539.21:537.86

## ЭФФЕКТ НЕРНСТА–ЭТТИНГСГАУЗЕНА В НЕСТЕХИОМЕТРИЧНОМ СУЛЬФИДЕ МАРГАНЦА\*

А. М. Харьков\*, М. Н. Ситников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: khark.anton@mail.ru

*Определены температурные зависимости коэффициентов термоэдс и затухания звука в нестехиометричном сульфиде марганца. Установлена корреляция температур максимумов и механизм рассеяния на фононах. Найден и исследован продольный эффект Нернста–Эттингсгаузена.*

*Ключевые слова: полупроводники, термоэдс, эффект Нернста–Эттингсгаузена.*

## THE NERNST-ETTINGSHAUSEN EFFECT IN NONSTICHIOMETRIC MANGANESE SULFIDE

A. M. Kharkov\*, M. N. Sitnikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: khark.anton@mail.ru

*The temperature dependences of the thermopower and sound attenuation coefficients in nonstoichiometric manganese sulfide are determined. The correlation between the temperatures of the maxima and the mechanism of scattering by phonons are established. The longitudinal Nernst–Ettingshausen effect was found and studied*

*Keywords: semiconductors, thermopower, Nernst–Ettingshausen effect.*

Полупроводники, в которых наблюдается эффект Нернста–Эттингсгаузена (НЭ), могут быть использованы в качестве составляющих компонент сенсорной техники, термоэлектрических источников электроэнергии, магнитной памяти и для создания охлаждающих устройств. Материалы, обладающие гигантским эффектом НЭ на порядок меняют величину термоэдс во внешнем магнитном поле. Продольный эффект НЭ заключается в изменении термоэдс полупроводников под действием магнитного поля. В отсутствие магнитного поля термоэдс в электронном полупроводнике определяется разностью компонент скоростей быстрых электронов (движущихся с горячей стороны) и медленных электронов (движущихся с холодной стороны) вдоль градиента температуры. При наличии магнитного поля продольные (вдоль градиента температуры) и поперечные (поперек градиента температуры) компоненты скоростей электронов изменяются в зависимости от угла поворота скорости электронов в магнитном поле, определяемого временем свободного пробега электронов.

Эффект НЭ обнаруживают халькогениды со структурой сфалерита. Это полуметаллы с топологической изоляцией. К ним относится теллурид ртути. Концентрационная зависимость продольного эффекта НЭ в HgTe определена в интервале 50-200 К и меняется по величине от 5 до 20 мкВ/К в сильном магнитном поле. Магнитотермоэдс обусловлена в основном неупругим рассеянием на полярных примесях. Замещение ртути кадмием приводит к росту коэффициента НЭ. Зависимость общей термоэдс  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  при различных значениях магнитных полей в интервале 5-200 К исследована в [1]. Определены температурные зависимости продольного эффекта Нернста–Эттингсгаузена

---

\* Работа поддержана Российским научным фондом, Правительством Красноярского края и проектом Красноярского научного фонда № 23-22-10016.

( $\Delta\alpha(T, B)$ ) при различных значениях магнитного поля. Обнаружено два максимума  $\Delta\alpha(T, B) = 0.8$  мВ/К в области  $T \approx 10-12$  К и  $\Delta\alpha(T, B) = 0.3$  мВ/К при 70 К.

Фазовый состав и кристаллическая структура синтезированных образцов  $Mn_{0.9}S$  исследовались на рентгеновской установке ДРОН-3 с использованием  $CuK_{\alpha}$  – излучения при комнатной температуре. Согласно рентгеноструктурному анализу синтезированные соединения являются однофазными и имеют кубическую решетку типа NaCl [2].

Величина термоэдс определяется тепловым потоком носителей тока электронов и дырок. В нестехиометрическом сульфиде марганца  $Mn_{0.9}S$  возможно существование двух типов ионов  $Mn^{2+}$  и  $Mn^{3+}$ , что создает предпосылки создания решеточных поляронов [3]. На рис. 1а приведены термоэдс без поля и в магнитном поле. В АФМ фазе знаки термоэдс отличаются по знаку. Рост термоэдс при охлаждении в нулевом поле вызван уменьшением рассеяния дырок на акустических фононах. Взаимодействие дырок с длинноволновыми акустическими фононами хорошо описывает экспериментальные результаты  $\alpha(T) \sim A/T^3$  в области низких температур 90 К – 125 К до температуры ромбоэдрического искажения решетки  $T = 125$  К в сульфиде марганца. Поток электронов реализуется по катионной подсистеме, в которой электроны взаимодействуют с локализованными спинами за счет sd-взаимодействия. В поликристаллическом АФМ магнитные моменты подрешеток скашиваются во внешнем магнитном поле и формируется намагниченность по полю. При нагревании восприимчивость АФМ растет за счет увеличения плотности магнонов. В парамагнитной области термоэдс уменьшается в магнитном поле. Размытые максимумы термоэдс при  $T = 245$  К и 400 К смещаются в магнитном поле до  $T = 215$  К и 465 К в результате изменения топологии пиннингования дырочных и решеточных поляронов [4].

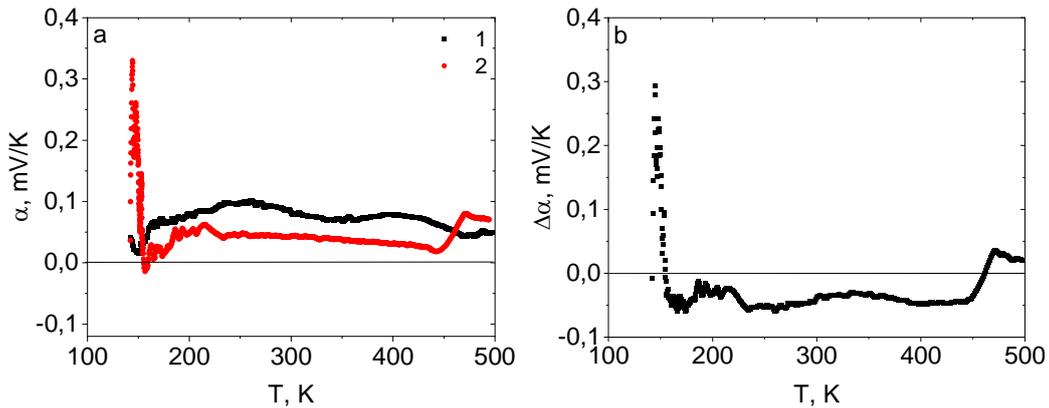


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента термоэдс  $\alpha$  без поля  $H = 0$  (1) и в магнитном поле  $H = 8$  кЭ (2) для  $Mn_{0.9}S$  (a). Разность термоэдс  $\Delta\alpha$  от температуры для  $Mn_{0.9}S$  (b).

Взаимодействие между упругой, электронной и магнитной подсистемой проявится в затухании ультразвука. Коэффициент затухания звука от температуры представлен на рис. 2.

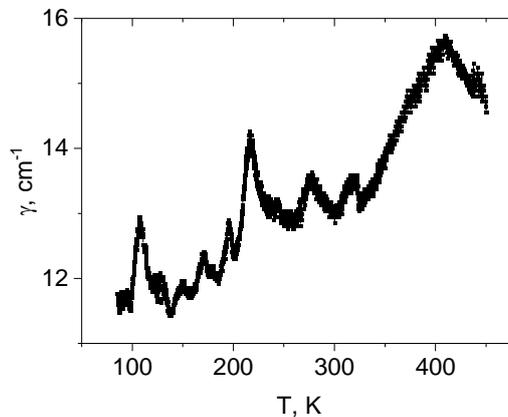


Рис. 2. Коэффициент затухания звука  $\gamma$  для  $Mn_{0.9}S$  от температуры

В области структурных фазовых переходов коэффициент затухания звука максимален и связан с флуктуацией плотности материала. Максимум  $\gamma(T)$  при  $T = 102$  К коррелирует с минимум сопротивления и коэффициентом теплового расширения в  $Mn_{0.9}S$  при этой температуре. Возможно, это связано с образованием ферронов при этой температуре.

Переходы типа смещения, вызванные деформацией октаэдров при 218 К и 404 К согласуются с максимумом  $\alpha(T)$  при  $T = 220$  К и  $\beta(T)$  при 400 К. Линейный рост коэффициента затухания звука при нагревании выше 325 К вызван рассеянием поляронов на фонах согласно выражению [5]:

$$(\alpha / f^2)_{th} = \frac{4\pi^2 \langle \gamma_i^j \rangle 2KT}{2\rho V^5}$$

где  $f$  – частота фона,  $V$  – скорость фононов,  $\rho$  – плотность фононов,  $K$  – теплопроводность,  $\gamma$  – параметр Грюнаизена.

### Библиографические ссылки

1. Алиев С.А. Явления переноса заряда и тепла в узкощелевых и бесщелевых полупроводниках. Баку, Элм, 2008).
2. Magnetoimpedance, Jahn-Teller transitions upon electron doping of manganese sulfide // S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, S.O. Konovalov, A.M. Vorotinov / *JMMM.*, 2020. V. 513. P. 167104.
3. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solution / S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, A.N. Masyugin, V.V. Kretinin, O.B. Fisenko, M.V. Gorev // *Phys. Status Solidi B.* 2019. V. 259. P. 1900043.
4. Electrical resistance and impedance of manganese sulfides, substituted by lutetium / A.M. Kharkov, M.N. Sitnikov, O.B. Begisheva, A.V. Gelgorn, O.S. Nikitinskiy, N.A. Cheremnykh // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2021. V. 1181. P. 012006.
5. Magnetoresistance and Electric Polarization in the  $Lu_xMn_{1-x}S$  Compound / S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, O.B. Begisheva, F.V. Zelenov // *Phys. Status Solidi B.* 2022. V. 259. P. 2100555.

### References

1. Aliev S.A. [Phenomena of charge and heat transfer in narrow gap and gapless semiconductors]. Baku, Elm, 2008.
2. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., Konovalov S.O., Vorotinov A.M. [Magnetoimpedance, Jahn-Teller transitions upon electron doping of manganese sulfide]. *JMMM.*, 2020, Vol. 513, P. 167104.
3. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., Masyugin A.N., Kretinin V.V., Fisenko O.B., Gorev M.V. [Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solution]. *Phys. Status Solidi B*, 2019, Vol. 256, P. 1900043.
4. Kharkov A.M., Sitnikov M.N., Begisheva O.B., Gelgorn A.V., Nikitinskiy O.S., Cheremnykh N.A. [Electrical resistance and impedance of manganese sulfides, substituted by lutetium]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, Vol. 1181, P. 012006.
5. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Kharkov A.M., O.B. Begisheva, F.V. Zelenov [Magnetoresistance and Electric Polarization in the  $Lu_xMn_{1-x}S$  Compound]. *Phys. Status Solidi B*, 2022, Vol. 259, P. 2100555.

© Харьков А. М., Ситников М. Н., 2023

УДК 539.21:537.86

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ В СУЛЬФИДЕ МАРГАНЦА С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ ЗАМЕЩЕНИЕМ

Н. А. Черемных\*, О. С. Никитинский

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: natasha13082002@gmail.com

*Определены температурные зависимости диэлектрической восприимчивости и импеданса при фиксированных частотах 1 кГц – 300 кГц. Найден активационный характер времени релаксации и энергия активации.*

*Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, полупроводники.*

## DIELECTRIC SUSCEPTIVENESS IN MANGANESE SULPHIDE WITH RARE EARTH SUBSTITUTION

N. A. Cheremnykh\*, O. S. Nikitinsky

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: natasha13082002@gmail.com

*The temperature dependences of dielectric susceptibility and impedance were determined at fixed frequencies of 1 kHz – 300 kHz. The activation nature of the relaxation time and activation energy were found.*

*Keywords: semiconductors, dielectric constant.*

Поиск новых материалов для микроэлектроники является актуальной задачей. В качестве перспективных материалов исследуются халькогениды марганца [1] и манганиты [2], обладающие колоссальным магнитосопротивлением. Неизовалентное замещение приводит к неоднородному распределению электрического заряда в образце. Электронное допирование приводит к вырождению в марганцевой подсистеме, которое может быть снято электрон-фононным взаимодействием (эффект Яна-Теллера) [3] или спин-орбитальным взаимодействием [4]. В переменном электрическом поле смещение электрических зарядов может не совпадать по фазе с внешним полем. Возможно опережение или отставание по фазе. Возможно, это обусловлено образованием орбитального стекла, возникновение которого зависит от температуры. Время релаксации подчиняется закону Аррениуса с энергией активации  $dE=0.35$  eV.

Диэлектрическая восприимчивость определялась из емкости плоского конденсатора с образцом, измеренного на анализаторе компонентов АМ-3028 в интервале частот 100-106 Гц. Нормированная величина диэлектрической проницаемости убывает для частот меньших 50 кГц до 300 К, при более высоких частотах убывает выше комнатной температуры. Температурная зависимость  $Re(\epsilon)/Re(\epsilon, T=100K)$  качественно согласуется с зависимостью обратной величины реактивной части  $1/X(T)$ . Это значит, что реактивное сопротивление обусловлено емкостью и электрическое напряжение внутри образца отстает по фазе на 90 градусов. В общем случае  $X=L\omega-1/\omega C$ , где  $L$  – индуктивность,  $C$  – емкость. Диэлектрические потери на частотах ниже 10 кГц имеют минимум при 230 К, возможно, обусловленный индуктивностью и орбитальными флуктуациями. Выше комнатной температуры минимумы в мнимой части диэлектрической проницаемости сдвигаются в область высоких температур (Рис. 1b).

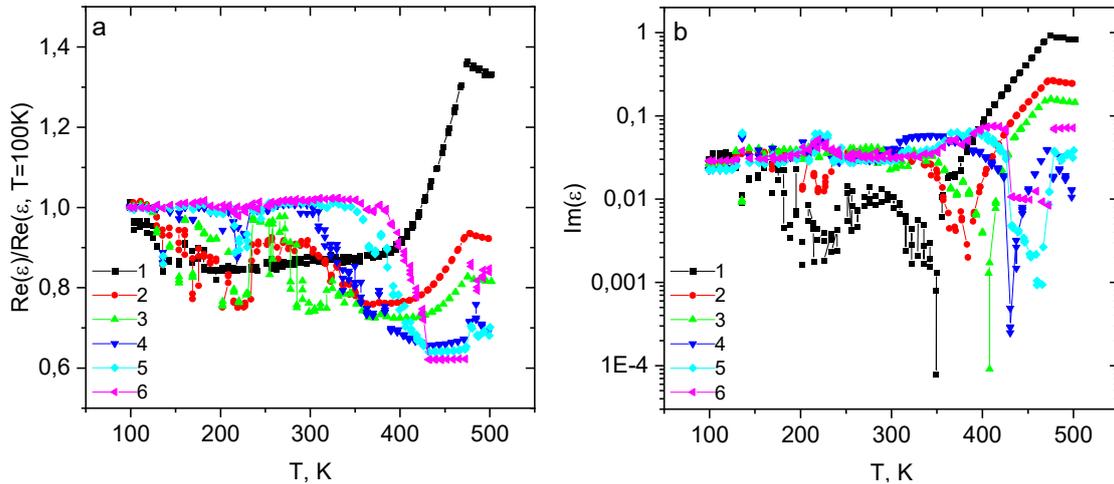


Рис. 1. (a) – нормированное значение действительной части диэлектрической проницаемости  $Re(\epsilon)/Re(\epsilon, T=100K)$  и (b) – логарифмическая зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости  $Im(\epsilon)$  для  $Ho_xMn_{1-x}S$  с  $x = 0,05$  на частотах  $\omega = 1$  кГц (1), 5 кГц (2), 10 кГц (3), 50 кГц (4), 100 кГц (5), 300 кГц (6) от температуры.

Сдвиг температур  $Im(\epsilon)$  для  $Ho_xMn_{1-x}S$  с  $x=0.05$  коррелирует с температурами максимумов реактивной части импеданса.

Температурное поведение комплексной восприимчивости без поля и в магнитном поле качественно отличаются. На Рис. 2 приведены нормированные величины  $Re(\epsilon)/Re(\epsilon, T=80K)$  и  $Im(\epsilon)/Im(\epsilon, T=80K)$  от температуры в магнитном поле 12 кЭ. При нагревании в поле диэлектрическая проницаемость растет с двумя скачками при 160 К и при 265 К.

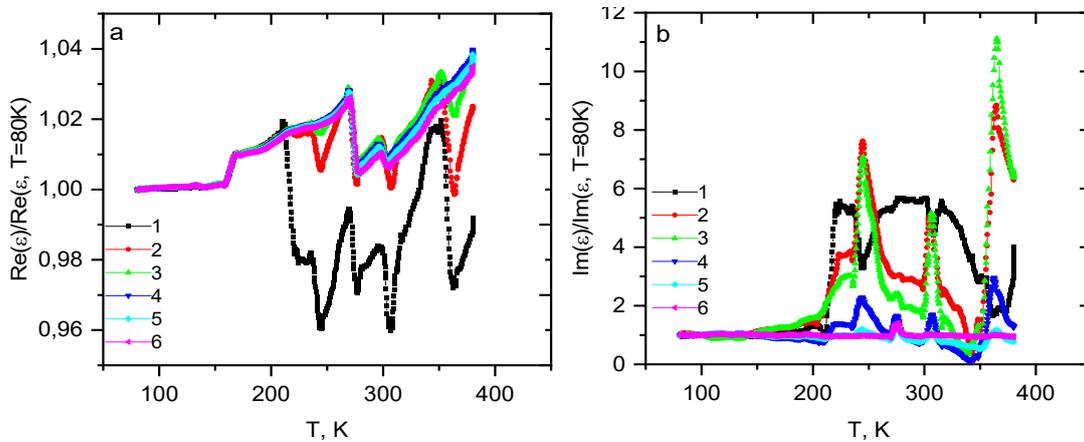


Рис. 2. (a) – нормированное значение действительной части диэлектрической проницаемости  $Re(\epsilon)/Re(\epsilon, T=80K)$  и (b) – значение нормированной мнимой части диэлектрической проницаемости  $Im(\epsilon)/Im(\epsilon, T=80K)$  для  $Ho_xMn_{1-x}S$  с  $x = 0,05$  в магнитном поле  $H = 12$  кЭ на частотах  $\omega = 1$  кГц (1), 5 кГц (2), 10 кГц (3), 50 кГц (4), 100 кГц (5), 300 кГц (6) от температуры

Наблюдается небольшая аномалия в области 360 К. Затухание в окрестности этих температур обнаруживает максимумы (Рис. 2b). Диэлектрические потери увеличиваются в магнитном поле и имеют резонансный характер.

Температурная зависимость  $Re(\epsilon)/Re(\epsilon, T=115 K)$  описывается в модели Дебая [5]:

$$Re(\epsilon) = A/(1+(\omega\tau)^2); Im(\epsilon) = B_{\omega\tau}/(1+(\omega\tau)^2) \quad (1)$$

где  $A, B$  – параметры,  $\tau$  – время релаксации, которое описывается по закону Аррениуса с  $\tau=\tau_0 \exp(\Delta E/kT)$ . В модели Дебая максимум релаксации связан с соотношением  $\omega\tau=1$ . Температуры максимумов в  $Im(\epsilon)$  с ростом частоты сдвигаются в область высоких температур.

Тип взаимодействия в системе  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  зависит от концентрации замещения и температуры. При малых концентрациях замещения примесные электроны локализованы в потенциальных ямах и необходимо сообщить большую энергию для делокализации электронов. В системе с концентрациями, превышающие  $x=0.05$ , образуются кластеры ионов гольмия, в которых электроны перемещаются за время наблюдения. В этом случае диэлектрические характеристики можно описать в модели Дебая. Максимумы в температурной зависимости реактивной части связаны с минимумом диэлектрических потерь. Для больших концентраций гольмия  $x=0.1$  диэлектрическая проницаемость описывается в модели Дебая. Найден активационный характер времени релаксации и энергия активации.

#### Библиографические ссылки

1. Magnetotransport effects in paramagnetic  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  / S. S. Aplesnin, and M. N. Sitnikov // JETP Lett. 2014. 100 (2), С. 95-101.
2. Effect of bond fluctuations on the transport properties of manganites and nickelates / S. S. Aplesnin // JETP. 2007. 104 (5), С 766-774
3. Magnetotransport Effects and Electronic Phase Separation in Manganese Sulfides with Electron–Hole Doping / O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, and L. V. Udod // JETP. 2021. 132 (5), С. 831-842.
4. Spin–spin and spin–orbit interaction effects of two-electron quantum dots/ B. Vaseghi, G. Rezaei, S. F. Taghizadeh, and Z. Shahedi // Phys. B. Cond. Matt. 2014. 449, С.129-132.
5. Dielectric response of materials: extension to the Debye model/ P. Q. Mantas // J. Eur. Ceram. Soc. 1999. 19 (12), С. 2079-2086 .

#### References

1. S. S. Aplesnin, and M. N. Sitnikov [Magnetotransport effects in paramagnetic  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ]. JETP Lett, 2014. 100 (2), p. 95-101.
2. S. S. Aplesnin [Effect of bond fluctuations on the transport properties of manganites and nickelates]. JETP, 2007. 104 (5), p. 766-774.
3. . O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, and L. V. Udod [Magnetotransport Effects and Electronic Phase Separation in Manganese Sulfides with Electron–Hole Doping].JETP, 2021. 132 (5), p. 831-842.
4. B. Vaseghi, G. Rezaei, S. F. Taghizadeh, and Z. Shahedi [Spin–spin and spin–orbit interaction effects of two-electron quantum dots]. Phys. B. Cond. Matt, 2014. 449, p. 129-132.
5. P. Q. Mantas [Dielectric response of materials: extension to the Debye model ]. J. Eur. Ceram. Soc, 1999. 19 (12), p. 2079-2086 .



**Секция**

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
(Газодинамика, гидродинамика,  
теория упругости и пластичности,  
реология)»**

УДК 519.6

## ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОДОВОЙ ДИНАМИКИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В БОЛОТНО-ОЗЕРНЫХ ЛАНДШАФТАХ

В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова\*

Институт вычислительного моделирования СО РАН,  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44  
\* E-mail: sv@icm.krasn.ru

*Рассматривается применение упрощенной модели для оценки годовой динамики вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах с использованием дистанционных измерений температуры поверхностного слоя.*

*Ключевые слова: вечная мерзлота, математическая модель, задача Стефана, годовая динамика.*

## NUMERICAL ALGORITHM FOR INVESTIGATING ANNUAL PERMAFROST DYNAMICS IN SWAMP-LAKE LANDSCAPES

V. M. Belolipetskii, S. N. Genova\*

\* ICM SB RAS, a subdivision of FRC KSC SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\* E-mail: sv@icm.krasn.ru

*The application of a simplified model to estimate the annual permafrost dynamics in swamp-lakes landscapes using remote measurements of surface layer temperature is considered.*

*Keywords: permafrost, mathematical model, Stefan problem, annual dynamics.*

Для исследования мощности сезонно-талого слоя применяются математические модели различного уровня сложности [1–5]. Теоретическое описание вечной мерзлоты осуществляется с помощью решений задач Стефана. Математические модели основываются на уравнениях теплопроводности для мерзлых и талых слоев. Рассматриваются территории, на которых имеются озера или болота. В вертикальной структуре зоны вечной мерзлоты выделяются слои: талый грунт, мерзлый грунт, вода, лед, снег. Возможны различные варианты расположения этих слоев. Можно выделить два типа водоемов: а) водоемы, которые зимой промерзают до дна, а летом лед тает по всей глубине и протаивают верхние слои дна («мелкие» водоемы); б) водоемы, которые зимой не замерзают до дна («глубокие» водоемы).

Для «мелких» водоемов рассматриваются пять вариантов (таблица 1, [5]). При переходе с одного варианта на другой слои добавляются или исключаются. Предложен упрощенный численный алгоритм решения одномерных (в вертикальном направлении) задач теплопроводности с подвижными границами фазового перехода с образованием новых и аннулированием существующих слоев, позволяющий описать годовую динамику замерзания-оттаивания вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах. В докладе рассматриваются задачи с заданными значениями температуры поверхностного слоя (данные дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности).

Таблица 1

**Варианты расположения мерзлых и талых слоев в болотно-озерных ландшафтах**

№ варианта	Снег	Вода	Лед	Талый грунт	Мерзлый грунт
1	+		+		+
2		+	+		+
3		+		+	+
4	+		+	+	+
5	+		+	+	+

**Численный алгоритм.** Вертикальные распределения температуры в рассматриваемых слоях определяются из решений уравнений теплопроводности, удовлетворяющих соответствующим граничным условиям:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\lambda_i}{c_{v,i}} \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}.$$

Здесь  $T_i(t, z)$  – температура  $i$ -го слоя,  $t$  – время,  $z$  – вертикальная координата (направлена вниз),  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности,  $c_{v,i}$  – объемный коэффициент теплоемкости грунта.

Рассмотрим произвольный  $i$ -ый слой,  $h_{i-1} \leq z \leq h_i$ ,  $\delta_i = h_i - h_{i-1}$  – толщины соответствующих слоев. Введем равномерную разностную сетку в прямоугольнике  $[0 \leq \xi_i \leq 1, 0 \leq t \leq t_k]$ ,

$$\Delta \xi_i = \frac{1}{N_i - 1}, \quad \xi_{i,j} = \frac{j-1}{N_i - 1}, \quad t_{n+1} = t_n + \Delta t, \quad i=1, 2, 3, 4, 5,$$

$$1 \leq j \leq N_i, \quad T_{i,j}^{n+1} = T_i(t_{n+1}, \xi_{i,j}),$$

$N_i$  количество точек в соответствующем слое. Сеточные уравнения, соответствующие дифференциальному уравнению теплопроводности в новых переменных в приближении медленных движений границ фазового перехода для внутренних точек  $i$ -го слоя, имеют вид:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{\lambda_i}{c_{v,i} \cdot \delta_i^2} \cdot \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta \xi_i^2},$$

**Сезонные периоды динамики вечной мерзлоты.**

**Зимний период.** Выделяются интервалы времени, на которых температура воздуха  $T_a$  одного знака. Для зимнего периода  $T_a < 0$ . Для оценки термического сопротивления снежного покрова используется квазистационарное приближение. Снежный покров схематизируется двумя слоями. Для вычисления температуры грунта на границе снег–лед получена формула:

$$T_{1,1}^n = \frac{T_{1,2}^n + \mu_{sn} T_a}{1 + \mu_{sn}}, \quad \mu_c = \frac{\lambda_{sn,1} \delta_1 \Delta_1}{\lambda_1 (\delta_{sn,1} + \delta_{sn,2} \lambda_{sn,1} / \lambda_{sn,2})}.$$

Здесь  $T_a$  – температура воздуха,  $\lambda_{sn,1}, \lambda_{sn,2}$  – коэффициенты теплопроводности снега соответственно в слоях 1 и 2;  $\delta_{sn,1}, \delta_{sn,2}$  – толщины слоев снега 1 и 2,  $\lambda_1, \delta_1$  – коэффициент теплопроводности и глубина водоема. Предполагается, что известна температура в слое льда ( $T_{1,2}^n = T_1^n(t_n, \Delta_1)$ ). В начальный момент образуется мерзлый слой, толщиной  $\delta_1 = \delta_1^0$  с наличием снега толщиной  $\delta_{sn,1} = \delta_{sn,1}^0$ ,  $\delta_{sn,2} = 0$ .

**Модуль «таяние снега».** При повышении температуры снега весной до нуля  $0^\circ\text{C}$  начинается таяние снега. Затраты тепла на таяние снежного покрова толщиной  $\delta_{sn}$   $F_{sn} = 80 \rho_{sn} \delta_{sn}$  (кал/см<sup>2</sup>). Затраты тепла на прогрев снега до нуля  $F_{нагр} = c_{sn} \rho_{sn} \delta_{sn} T_{sn}$  (кал/см<sup>2</sup>),  $c_{sn}$  – теплоемкость снега (кал/(г град)). Теплообмен на границе снег–атмосфера  $F_{a-sn} = \alpha(T_a - T_{sn})$ , (кал/(см<sup>2</sup>с)), теплообмен на границе снег–мерзлый грунт (лед)  $F_{sn-gr} = \lambda_3(T_{3,2} - T_{3,1}) / (\delta_3 \Delta_3)$  (кал/(см<sup>2</sup>с)),  $\alpha = 5.54 \sqrt{W_2 + 0.3}$  (кал/(см<sup>2</sup>с град),  $W_2$  – скорость ветра (м/с). Из уравнения теплового баланса следует формула для оценки интервала времени таяния снега  $\tau_{sn}$ :  $\tau_{sn} = \frac{\rho_{sn} \delta_{sn} (80 - c_{sn} T_{sn})}{F_{a-sn} - F_{sn-gr}}$ .

На границе дно водоема  $z = h_j = h_{bt}$ :  $T_{j+1,1} = \frac{\lambda_j T_{j,Nj-1} / \Delta z_j + \lambda_{j+1} T_{j+1,2} / \Delta z_{j+1}}{\lambda_j / \Delta z_j + \lambda_{j+1} / \Delta z_{j+1}}$ .

На границах фазового перехода  $z = h_i$ ,  $T_{i,Ni} = T_{i+1,1} = T_{ph}$ :

если  $i$ -й слой мерзлый,  $i+1$ -ый – талый  $\rho_i L_i \frac{d h_i}{d t} = \left( \frac{\lambda_i}{\Delta z_i} + \frac{\lambda_{i+1}}{\Delta z_{i+1}} \right) T_{i+1,1} - \frac{\lambda_i}{\Delta z_i} T_{i,Ni-1} - \frac{\lambda_{i+1}}{\Delta z_{i+1}} T_{i+1,2}$ ;

$$\text{если } i\text{-й слой талый, } i+1\text{-ый – мерзлый } -\rho_{i+1} L_{i+1} \frac{dh_i}{dt} = \left( \frac{\lambda_i}{\Delta z_i} + \frac{\lambda_{i+1}}{\Delta z_{i+1}} \right) T_{i+1,1} - \frac{\lambda_i}{\Delta z_i} T_{i,Ni-1} - \frac{\lambda_{i+1}}{\Delta z_{i+1}} T_{i+1,2}.$$

Здесь  $T_{ph}$  – температура фазового перехода,  $\rho_i$  – плотность  $i$  – го слоя.

Начальные условия:  $T_i(0, z) = T_i^0$ ,  $\delta_i = \delta_i^0$ . При  $z=H$   $T_{2,N_2} = T_H$ .

Особенностью модели является относительно небольшое количество входных параметров. В рассмотренном варианте для прогноза динамики сезонно-талого слоя достаточно знать сценарии изменений температуры воздуха. Разработанная численная модель позволяет исследовать годовую динамику температурного режима в районах вечной мерзлоты с использованием данных наземных и дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности.

### Библиографические ссылки

1. Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э. Прогноз изменения мерзлотных условий в северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы // Криосфера Земли, № 2 (1998), 53-57.
2. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири // Криосфера Земли. 2000. № 4. С. 49-57.
3. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. 2007. № 4. С. 65-69.
4. Belolipetskii V.M., Genova S.N. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. Т. 9. No. 2. P. 158-165.
5. Belolipetskii V. M., Genova S. N. One-dimensional vertical model of permafrost dynamics. Труды конференции в журнале IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. doi:10.1088/1755-1315/193/1/012005.

### References

1. Anisimov O.A., Nelson F.E. Forecast of changes in permafrost conditions in the northern hemisphere: application of the results of balance and transitive calculations using models of general atmospheric circulation // Cryosphere of the Earth, No. 2 (1998), 53-57.
2. Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadezhina E.D., Model estimates of permafrost evolution and distribution of the seasonal thawing layer depending on climatic conditions in the northern regions of Western Siberia // Earth Cryosphere. 2000. № 4. С. 49-57.
3. Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Demchenko P.F., Mokhov I.I. Modeling of changes in temperature and hydrological regimes of near-surface permafrost using climatic data (reanalysis) // Cryosphere of the Earth. 2007. № 4. С. 65-69.
4. Belolipetskii V.M., Genova S.N. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. Т. 9. No. 2. P. 158-165.
5. Belolipetskii V. M., Genova S. N. One-dimensional vertical model of permafrost dynamics. Труды конференции в журнале IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. doi:10.1088/1755-1315/193/1/012005.

© Белолипецкий В. М., Генова С. Н., 2023

УДК 517.96

## РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ИНЕЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КОНТАКТЕ С ПОТОКОМ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Е. Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Представлены результаты расчета динамики инееобразования на плоской поверхности с заданным распределением температуры. Проведен анализ влияния температурного профиля на динамику нарастания слоя инея.*

*Ключевые слова: инееобразование, поток влажного воздуха, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.*

## CALCULATION OF FROST FORMATION DYNAMICS ON FLAT SURFACE IN CONTACT WITH HUMID AIR FLOW

E. N. Vasil'ev

Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*The results of calculating the dynamics of frost formation on the surface of a fin with a given temperature distribution are presented. The influence of temperature distribution on the dynamics of frost layer growth was analyzed.*

*Keywords: frost formation, humid air flow, heat and mass transfer, heat transfer coefficient.*

Обтекание влажным воздухом поверхностей, имеющих отрицательную температуру, сопровождается формированием на них слоя инея или льда. Такое явление наблюдается при работе холодильных установок и на внешних элементах авиационной техники. Образование слоя инея или льда изменяет условия теплообмена и аэродинамические характеристики, что может негативно влиять на эксплуатационные характеристики технических устройств. В настоящей работе рассматривается динамика инееобразования применительно к ребристо-пластинчатым теплообменникам, учет этого процесса необходимо учитывать при выборе их конструкции и геометрических параметров. Экспериментально процесс инееобразования в таком теплообменнике исследовался в [1]. Моделирование динамики нарастания слоя инея дает возможность оценить оптимальную продолжительность работы теплообменника без профилактического оттаивания.

Рассмотрим процесс обтекания влажным воздухом поверхности ребер теплообменника, имеющих температуру ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . Пространство между ребрами теплообменника представляет собой щелевой канал, имеющий постоянное поперечное сечение и расстояние между пластинами ребер  $2\delta_0$  (рис. 1). В начальный момент времени канал свободен от инея, поэтому течение воздуха происходит по всему его поперечному сечению. С течением времени на поверхности ребер  $I$  формируется слой инея  $2$  толщиной  $\delta_f$ , который уменьшает высоту проходного сечения канала  $2\delta = 2\delta_0 - 2\delta_f$ , причем толщина слоя инея меняется как по времени, так и по длине канала. Расчетная область, которая рассматривается при решении задачи, на рисунке выделена штриховым контуром. Расчетная область включает в себя зоны воздушного потока и слоя инея, которые имеют подвижную во времени границу раздела.

Определим системы уравнений для расчета параметров среды в этих зонах. Скорость потока в канале много меньше скорости звука, поэтому будем рассматривать воздух в данной задаче как несжи-

маемую среду. Кроме того, изменение толщины слоя инея является самым медленным процессом в канале, следовательно, газодинамическое течение в каждый момент времени является установившимся (квазистационарным), поскольку быстро подстраивается к текущему профилю слоя инея. Таким образом, система уравнений, описывающая стационарное течение влажного воздуха, запишется в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{d(uS)}{dx} &= 0, \\ \frac{d(\rho u^2 / 2 + p)}{dx} &= 0, \\ \frac{d(c_p T + u^2 / 2)}{dx} &= \frac{q_V}{\rho u}, \\ \frac{d\rho_v}{dx} &= -\frac{j}{u},\end{aligned}$$

где  $\rho$ ,  $p$ ,  $u$  – плотность, давление и скорость воздуха,  $S$  – площадь поперечного сечения канала,  $\rho_v$  – плотность пара,  $j$  – масса сконденсированного за 1 с пара, объёмная мощность стока теплоты  $q_V$  определяется теплообменом потока воздуха с поверхностью слоя инея.

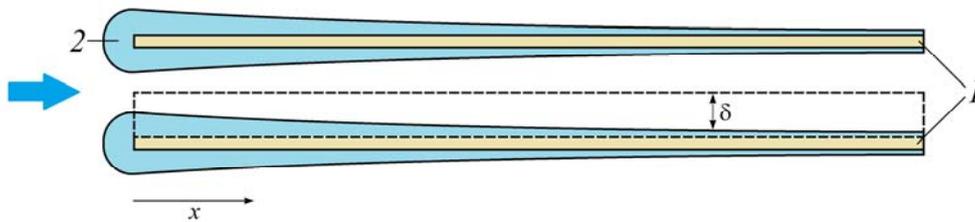


Рис. 1. Межреберный канал теплообменника: ребра – 1, слой инея – 2, расчетная область задачи выделена пунктиром

Моделирование динамики осаждения инея на плоской поверхности проведено с помощью модели, основанной на аналитических соотношениях и эмпирических зависимостях [2]:

$$\begin{aligned}\frac{dm_f}{dt} &= -\frac{\alpha(\omega - \omega_{fs})}{c_p}, \\ \delta_f &= \sqrt[3]{\frac{6,34 \times 10^{-6} \alpha(\omega - \omega_{fs}) t^2 (T_{fs} - T_p)}{c_p [\alpha(\omega - \omega_{fs}) + 2c_p (T - T_{fs})]}}, \\ T_{fs} &= T_p + A\beta \left[ 1 + 0,5\beta \left( 0,0196A + \frac{\beta c_f \rho_f}{2c_{p\lambda}} \right) \right], \\ A &= \frac{\alpha(T - T_{fs})\sqrt{t}}{\lambda} \left[ 1 + \frac{L(\omega - \omega_{fs})}{c_p(T - T_{fs})} \right],\end{aligned}$$

где  $m_f$  – удельная масса инея на единице поверхности ребра (кг/м<sup>2</sup>),  $t$  – время,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности инея,  $\omega$ ,  $\omega_{fs}$  – влагосодержание воздуха и воздуха при температуре поверхности слоя инея,  $\delta_f$  – толщина слоя инея,  $T_p$ ,  $T_{fs}$  – температура пластины ребра и поверхности слоя инея,  $\rho_f = m_f/\delta_f$  – плотность инея,  $\beta = \delta_f t^{0,5}$  – фактор роста слоя инея,  $L$  – скрытая теплота сублимации.

Динамику образования инея характеризуют зависимости толщины слоя  $\delta_f(x)$  на поверхности ребра в различные моменты времени. На рис. 2 приведены такие зависимости при  $\delta_0 = 1.5$  мм и однородном распределении температуры вдоль ребра  $T_p(x) = -20^\circ\text{C}$ . Наиболее быстро рост слоя инея происходит вблизи входного сечения, где воздушный поток имеет максимальное влагосодержание. По мере уда-

ления от входного сечения толщина слоя инея монотонно снижается вследствие падения в потоке содержания пара из-за его непрерывной конденсации.

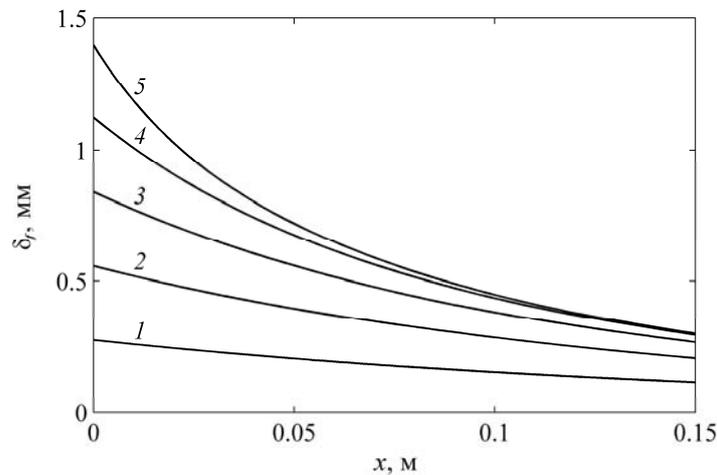


Рис. 2. Зависимости толщины слоя инея от координаты  $x$  в различные моменты времени:  
1 – 30 мин, 2 – 60 мин, 3 – 90 мин, 4 – 120 мин, 5 – 150 мин

Таким образом, представлена вычислительная модель для описания процесса формирования инея на поверхности с заданным распределением температуры, позволяющая рассчитывать зависимости толщины слоя инея, температуры и влажности воздуха, температуры поверхности инея вдоль ребра. Модель может быть использована для проведения оптимизации конструкции теплообменников холодильных установок.

#### Библиографические ссылки

1. Васильев Е.Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А. Экспериментальное исследование инеобразования в пластинчатом теплообменнике // Журнал Сибирского фед. ун-та. Сер. "Техника и технология". 2022. Т. 15. №1. С. 24–34.
2. Маринюк Б.Т. Расчеты теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники, М.: Машиностроение, 2015. 272 с.

#### References

1. Vasil'ev E.N., Emel'yanov D. P., Nesterov D. A. [Experimental Study of Frost Formation in a Plate Heat Exchanger] // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022, vol. 15, no. 1, p. 24-34. (In Russ.)
2. Marinyuk B.T. Calculations of heat transfer in apparatus and systems of low-temperature technology, Moscow, Mashinostroenie, 2015. 272 p. (In Russ.)

© Васильев Е. Н., 2023

УДК 517.96

## О ВЫБОРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Е. Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Рассмотрены вычислительные модели для решения задачи Стефана с учетом особенностей процессов замерзания воды и таяния льда. Представлены результаты расчета динамики ледяного покрова пресного водоема.*

*Ключевые слова: задача Стефана, вычислительное моделирование, динамика ледяного покрова.*

## ON THE CHOICE OF MATHEMATICAL MODEL FOR DESCRIPTION OF ICE COVER DYNAMICS

E. N. Vasil'ev

Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Computational models for solving the Stefan problem are considered taking into account the features of the processes of water freezing and ice melting. The results of calculating the dynamics of the ice cover of a fresh water body are presented.*

*Keywords: Stefan's problem, numerical simulation, ice cover dynamics.*

Моделирование температурных режимов и динамики ледяных покровов на водоемах имеет важное прикладное значение. Результаты вычислительного моделирования могут быть использованы для оценки и прогнозирования различных ледовых явлений, таких как начало ледостава, нарастание слоя льда в холодный период, уменьшение толщины, структуры и прочности ледяного покрова при наступлении потепления. Такие данные важны при определении сроков навигации и обеспечения безопасности ледовых переправ и зимников.

Для определения состояния ледяных покровов применяются различные расчетные методики. В упрощенных подходах для оценки параметров ледяных покровов анализ проводится на основе использования суммы отрицательных температур воздуха за холодный период года, либо применении уравнения теплового баланса двухслойной среды «лед–снег». Более точный результат обеспечивают нестационарные математические модели, основанные на решении задачи Стефана с учетом климатических данных, позволяющих учитывать факторы, влияющие на динамику ледяных покровов. В настоящей работе представлен анализ особенностей формирования и деградации льда на водоемах, влияющих на выбор математической модели для расчета температурного режима и динамики ледяного покрова.

Процессы формирования льда при наступлении отрицательных температур и таяния при оттепелях имеют определенные особенности [1]. При ледообразовании происходит формирование переходной зоны кристаллизации, захватывающей как слой переохлажденной воды у нижней границы ледяного покрова, в котором появляются и смерзаются между собой кристаллы льда игольчатой формы (рис. 1а), так и ближайшую к границе раздела слой льда, где происходит структурная релаксация. Таяние льда начинается по границам ледяных монокристаллов, из которых состоит поликристалличе-

ский лед, в результате в среде между кристаллами образуется объемная сеть прослоек воды, при этом ледяной покров приобретает рыхлую структуру и пропитывается талой водой (рис. 1б).

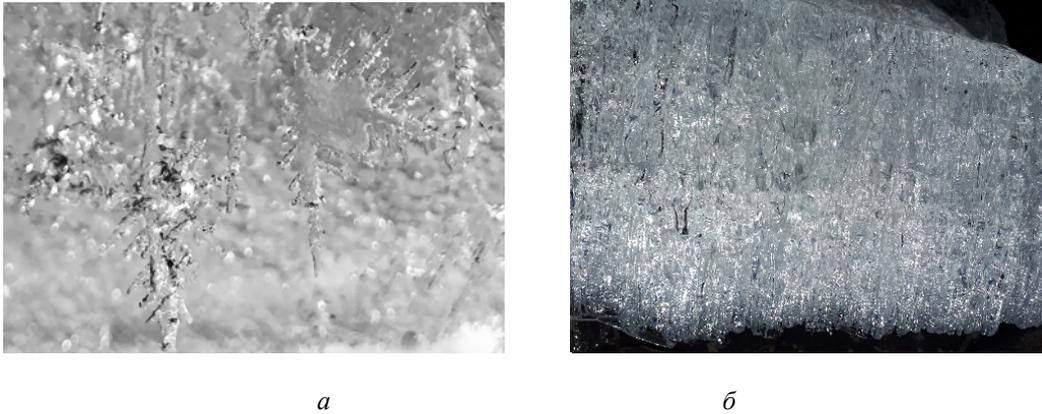


Рис. 1. Кристаллы на нижней поверхности льда при замерзании (а), структура льда при весеннем таянии (б)

В классической постановке задача с фазовыми переходами базируется на уравнении теплопроводности, которое дополняется условием Стефана. Это условие основывается на равенстве температур и выполнении условия баланса энергии на границе. В этой математической модели предполагается существование среды в каждой точке пространства только в одном из двух возможных фазовых состояний, а сама фазовая граница определяется как бесконечно тонкая геометрическая поверхность. В обобщенной формулировке задачи Стефана фазовая граница явно не выделяется, а теплота фазового перехода учитывается в виде добавки к теплоемкости среды. Добавочная теплоемкость задается в виде гладкой функции в узком температурном интервале, которому соответствует переходному состоянию среды, содержащей в себе обе фазы. Для решения такой задачи применимы стандартные численные методы сквозного счета. Сопоставление свойств рассмотренных математических моделей и особенностей процессов замерзания и таяния льда показывает, что обобщенная формулировка задачи Стефана более адекватно описывает динамику реального процесса, позволяя определять промежуточное состояние среды, соответствующее влажному льду.

Моделирование динамики ледового покрова водоема проведено в обобщенной формулировке на основе численного решения нестационарного уравнения теплопроводности

$$c_s(z)\rho(z)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_V(z),$$

где  $c_s$ ,  $\rho$  – удельная эффективная теплоемкость и плотность среды;  $T$  – температура;  $t$  – время,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $z$  – вертикальная координата, направленная вниз относительно поверхности водоема,  $q_V$  – мощность объемного теплового источника, обусловленного поглощением солнечного излучения. Неоднородность коэффициентов  $c_s$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  связана с наличием фазового перехода и различием теплофизических свойств воды, льда и снега. Вычислительный алгоритм и методика расчета тепловых потоков описаны в [2, 3].

С помощью модели определено состояние озера Бугач, при этом использованы климатические данные метеостанции Минино, которая находится вблизи водоема. Изменение состояния верхнего слоя водоема в холодный период года представлено на рис. 2. В течение холодного периода (ноябрь–март) идет практически монотонное нарастание толщины ледяного покрова 2. С наступлением оттепели в начале апреля толщина льда начинает уменьшаться снизу, при этом наблюдается резкое увеличение слоя 3, соответствующего состоянию «влажного льда». Подтаивание и увлажнение льда вызвано объемным тепловыделением, обусловленным поглощением солнечного излучения, и тепловым потоком со стороны дна. Среднесуточная температура самого верхнего слоя остается отрицательной из-за стока энергии вследствие испарения на поверхности водоема.

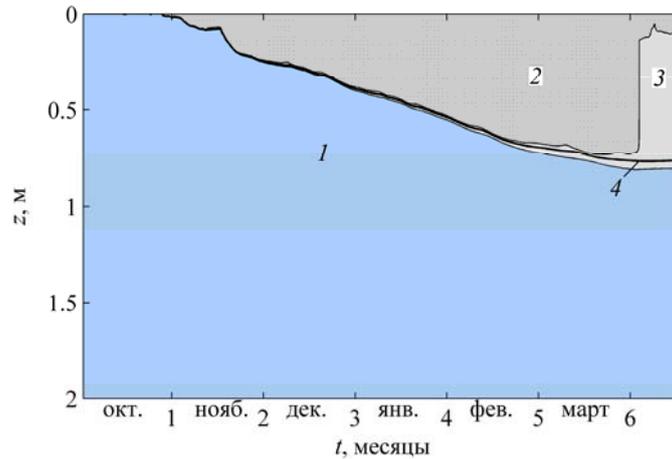


Рис. 2. Изменение состояния водоема: вода (1), лед (2), влажный лед (3), изотерма  $T=0^\circ\text{C}$  (4)

Таким образом, проведен анализ особенностей формирования и деградации ледяного покрова, для описания процесса выбрана адекватная математическая модель. По результатам вычислительного моделирования определена динамика ледового покрова с учетом комплекса основных метеорологических факторов.

#### Библиографические ссылки

1. Бородкин В.А., Ковалев С.М., Шушлебин А.И. Изменение строения и некоторых физических свойств ровного припайного льда в весенне-летний период 2014 г. в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова». Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65, № 1. С. 63-76.
2. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 3. С. 481–488.
3. Vasil'ev E.N. Modeling of the Ice Cover Dynamics of a Freshwater Reservoir // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2022. Vol. 15, № 6. P. 753–762.

#### References

1. Borodkin V.A., Kovalev S.M., Shushlebin A.I. Change of structure and some physical properties of level fast ice during the spring and summer period of 2014 in the vicinity the research station "Ice base Cape Baranov". Arctic and Antarctic Research. 2019. Vol. 65, № 1. P. 63-76. (In Russ.)
2. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A. The dynamics of phase changes in a heat storage of thermal control system for onboard radio-electronic equipment. Thermophysics and Aeromechanics. 2018. Vol. 25, № 3. P. 461–467.
3. Vasil'ev E.N. Modeling of the Ice Cover Dynamics of a Freshwater Reservoir // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2022. Vol. 15, № 6. P. 753–762.

© Васильев Е.Н., 2023

УДК 519.63

**РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА  
В ДИВЕРГЕНТНОЙ ФОРМЕ КОНСЕРВАТИВНЫМ ПОЛУЛАГРАНЖЕВЫМ МЕТОДОМ  
НА СЕТКЕ С РАЗНЫМИ ШАГАМИ ПО ВРЕМЕНИ**

А. В. Вяткин<sup>1\*</sup>, Е. В. Кучунова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д. 50 стр. 44

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

\* E-mail: vyatkin@icm.krasn.ru

*В работе построен консервативный полулагранжев алгоритм на неравномерной сетке. В разных частях пространственной сетки используются разные шаги по времени. Уравнение переноса входит в систему уравнений Навье-Стокса, описывающую течение газа из сопла.*

*Ключевые слова: консервативные полулагранжевы методы, уравнение переноса, закон сохранения, неравномерная сетка.*

**CONSERVATIVE SEMI-LAGRANGIAN ALGORITHM FOR TWO-DIMENSIONAL  
CONTINUITY EQUATION CONSTRUCTED ON NONUNIFORM GRID**

A. V. Vyatkin<sup>1\*</sup>, E. V. Kuchunova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modelling of SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobonii prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\* E-mail: vyatkin@icm.krasn.ru

*We present conservative semi-Lagrangian algorithm for two-dimensional continuity equation constructed nonuniform grid. This equation is involved to the system of Navier-Stokes equations. This system simulates gas flow near rocket nozzle.*

*Keywords: conservative semi-Lagrangian method, continuity equation, balance equation, nonuniform grid.*

На сегодняшний день более точное моделирование процессов вытекания газа из сопла ракеты основано на численном решении системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса [1–3]. Эта система включает в себя уравнение переноса в дивергентной форме. В работе описан новый подход вычисления решения уравнения переноса на вычислительной сетке, состоящей из двух частей, в которых используются разные шаги по времени. Продемонстрировано выполнение закона сохранения для численного решения в норме пространства  $L_1$ .

Рассмотрим одномерное уравнение переноса дивергентной форме

$$\partial \rho / \partial t + \partial(\rho u) / \partial x + \partial(\rho v) / \partial x = 0.$$

Будем полагать, что на множестве  $[0, T] \times \Omega$ , где  $T > 0$ ;  $\Omega = [0, 1] \times [0, 1]$ , известны функции скорости  $u(t, x, y)$  и  $v(t, x, y)$ , а для искомой функции  $\rho(t, x, y)$  заданы начальные и необходимые граничные условия. Множество  $\Omega$  разобьем на две части

$$\Omega_1 = \{(x, y): x \in [0, 2; 0, 8], y \in [0, 2; 0, 8]\} \text{ и } \Omega_2 = \Omega \setminus \Omega_1.$$

Зададим целые числа  $M > 2$  и  $N > 2$ , причем  $M$  – четное число. Определим  $\tau = T/M$ ,  $h = 1/N$ . Тогда на множестве  $[0, T] \times \Omega_2$  построим сетку с шагом по времени  $\tau$

$$\Omega_2^\tau = \{(t_k, x_i): t_k = k\tau, x_i = i h, y_j = j h; k = 0, \dots, M\},$$

а на множестве  $[0, T] \times \Omega_1$  построим сетку с шагом во времени, который в два раза больше

$$\Omega_1^\tau = \{(t_m, x_i): t_m = m 2 \tau, x_i = i h, y_j = j h; m = 0, \dots, M/2\}.$$

Будем искать численное решение  $\rho^h$  задачи в виде кусочно-постоянной функции, которая на каждом отдельном временном слое  $t_k$  (или  $t_m$ ) равна константе в окрестности

$$\omega_{i,j} = (x_i - h/2, x_i + h/2) \times (y_j - h/2, y_j + h/2) \cap \Omega_d, d = 1, 2$$

узла  $(t_k, x_i)$  (или  $(t_m, x_i)$ ) сетки  $\Omega_d^\tau$ ,  $d = 1, 2$ . Тогда, поиск численного решения  $\rho^h$  сводится к поиску решения в узлах сеток  $\Omega_1^\tau$  и  $\Omega_2^\tau$  на каждом временном слое. Численное решение задачи найдем с помощью консервативного полулагранжевого алгоритма [4-5]. Новизна и основная сложность созданного подхода состоит в алгоритме вычисления численного решения в узлах сеток  $\Omega_1^\tau$  и  $\Omega_2^\tau$ , прилегающих к общей границе этих сеток. Теоретически обосновано, что представленный метод имеет первый порядок сходимости численного решения к точному решению. Более того, теоретически показано выполнение закона сохранения для функции численного решения в норме пространства  $L_1$  при переходе с одного четного временного слоя на следующий четный слой. Проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие теоретические выкладки.

### Библиографические ссылки

1. Лапин Ю., Стрелец М. Внутренние течения газовых смесей. М. : Наука, 1989. 368 с.
2. Shaydurov V.V., Yakubovich M.V. Semi-Lagrangian Approximation of Conservation Laws of Gas Flow in a Channel with Backward Step // Smart Modeling for Engineering Systems. GCM50 2018. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. Vol. 133. P. 246-265.
3. Магомедов К. Метод характеристик для численного решения пространственных течений газа // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1966. Т. 6, № 2. С. 313-325.
4. Iske A., Kaser M. Conservative semi Lagrangian advection on adaptive unstructured meshes // Numerical Methods for Partial Differential Equations. 2004. Vol. 20(3). P. 388-411.
5. Combination of Semi-Lagrangian Approach and Finite Element Method for Navier-Stokes Equations / A. V. Vyatkin, E .V. Kuchunova, M. V. Yakubovich and others // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2293. P. 420057

### References

1. Lapin Yu. V., Strelets M. Kh. *Vnutrennie techeniya gazovykh smesey* [Internal flows of gas mixtures]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 368 p.
2. Shaydurov V.V., Yakubovich M.V. Semi-Lagrangian Approximation of Conservation Laws of Gas Flow in a Channel with Backward Step // Smart Modeling for Engineering Systems. GCM50 2018. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019, vol. 133. p. 246-265.
3. Magomedov K. Metod haracteristik dlya chislenного resheniya prostranstvennuh techenii gaza [Method of characteristics for numerical modelling of space gas flow]. Zhurnal vuchislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki [Journal of numerical mathematics and mathematical physics]. 1966. Vol. 6 (2). P. 313-325.
4. Iske A., Kaser M. Conservative semi-Lagrangian advection on adaptive unstructured meshes // Numerical Methods for Partial Differential Equations. 2004. Vol. 20(3). P. 388-411.
5. Combination of Semi-Lagrangian Approach and Finite Element Method for Navier-Stokes Equations / A. V. Vyatkin, E .V. Kuchunova, M. V. Yakubovich and others // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2293. P. 420057

УДК 533.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЛА С ЦИКЛИЧЕСКИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

А. А. Дектерев<sup>1,2\*</sup>, А. В. Сентябов<sup>1,2</sup>, Д. А. Дектерев<sup>1,2</sup>, Д. В. Вавилов<sup>2</sup>, Ар. А. Дектерев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, Красноярск, Свободный пр., 82А

\*E-mail: dekterev@mail.ru

*Работа посвящена результатам расчетно-экспериментальных исследований аэродинамики и тягово-энергетических характеристик циклических движителей и летательного аппарата с циклическими движителями. Для численного моделирования использовалось пространственное нестационарное CFD моделирование. Экспериментальные исследования выполнялись в аэродинамических трубах ИТПМ СО РАН, СибНИА и ЦАГИ.*

*Ключевые слова: циклический движитель, циклокоптер, аэродинамика, численное моделирование, аэродинамический эксперимент.*

## STUDY OF THE AERODYNAMICS OF AN AIRCRAFT WITH CYCLOIDAL ROTORS

A. A. Dekterev<sup>1,2\*</sup>, A. V. Sentyabov<sup>1,2</sup>, D. A. Dekterev<sup>1,2</sup>, D. V. Vavilov<sup>2</sup>, Ar. A. Dekterev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS  
1, Lavrentev ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
82A, Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail: dekterev@mail.ru

*The work is devoted to the results of computational and experimental studies of aerodynamics and traction and energy characteristics of cycloidal rotors and an aircraft with cycloidal rotors. For numerical modeling, spatial unsteady CFD modeling was used. Experimental studies were carried out in the wind tunnels of the ITAM SB RAS, SibNIA and TsAGI.*

*Keywords: cycloidal rotors, cyclocopter, aerodynamics, numerical modeling, aerodynamic.*

В последние годы заметен рост интереса к циклическим движителям и летательным аппаратам (ЛА) вертикального взлета-посадки на их основе [1-4]. Циклический движитель – это устройство, формирующее поток газа или жидкости, состоящее из ротора – набора лопастей, вращающихся по круговой орбите вокруг оси ротора и поворачивающихся вокруг собственной оси, системы управления углом атаки лопастей и двигательной установки.

В Институте теплофизики СО РАН проведен цикл расчетно-экспериментальных исследований аэродинамики циклического движителя. Созданы экспериментальные стенды для анализа структуры формируемого ротором потока (рис. 1) и изучения тягово-энергетических характеристик (рис. 2). Проведены испытания роторов трех масштабов: диаметром  $D=300$  мм с длиной лопасти  $L=330$  мм;  $D=600$  мм,  $L=500$  мм;  $D=1500$  мм,  $L=1600$  мм в условиях вертикального взлета/посадки и с имитацией полета в аэродинамических трубах ИТПМ СО РАН, СибНИА и ЦАГИ. Разработана и адаптирована по данным эксперимента математическая модель пространственной турбулентной аэродинамики ротора. Проведены расчетные исследования влияния конструкции ротора, параметров кинематического механизма, количества, типа профиля и размера лопастей на формируемую тягу и потребляемую мощность.

Проведенные исследования позволили предложить пути оптимизации конструкции циклического движителя для улучшения его тягово-энергетических характеристик.

Далее был создан ЛА с четырьмя циклическими движителями и выполнен цикл расчетно-экспериментальных исследований аэродинамики этого аппарата. Пример структуры потока вокруг ЛА с циклическими движителями показан на рисунке 4. На рисунке 5 представлены фотографии полета аппарата.



Рис. 1. Визуализация потока, формируемого циклическим движителем

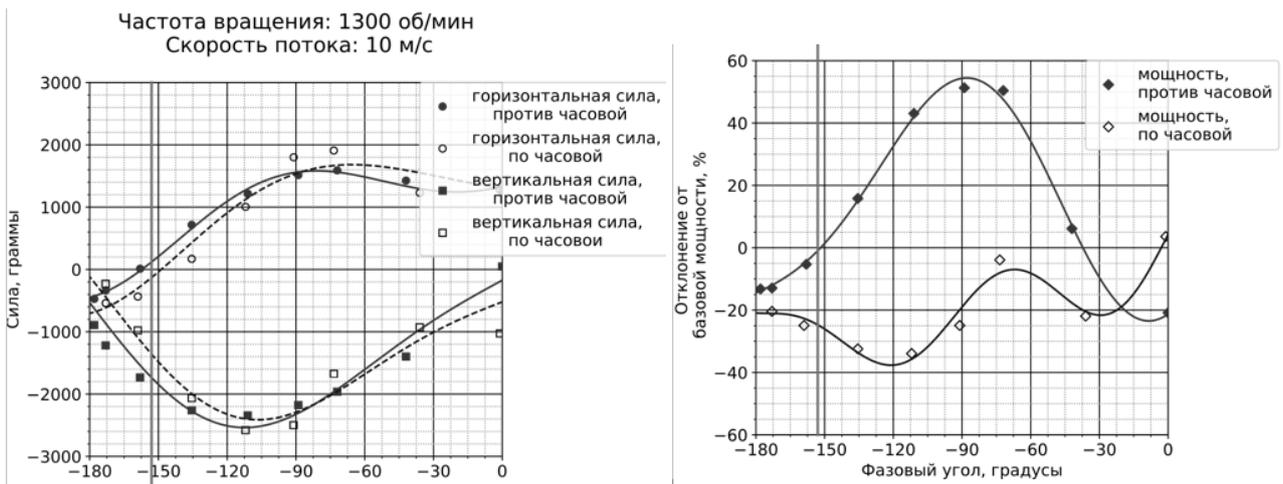


Рис. 2. Тягово-энергетические характеристики циклического движителя  $D=300$  мм и  $L=330$  мм

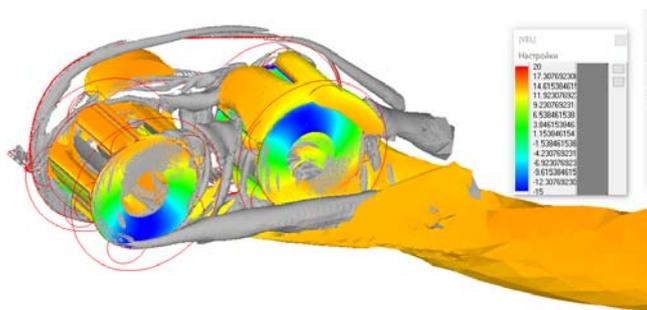


Рис. 3. Изоповерхность модуля скорости и вихревые структуры потока ( $\lambda_2$ )



а

б

Рис. 4. а) Полет по кругу, б) причаливание к вертикальной поверхности

Выполненные исследования показали, что потенциально возможно создание ЛА разных масштабов с использованием циклических движителей как основных тяговых устройств. На примере ЛА весом в 60 кг продемонстрированы возможности транспортного средства такого типа осуществлять вертикальные взлеты/посадки, посадки на наклонные поверхности, причаливание к вертикальным стенам.

#### Библиографические ссылки

1. Carlos M. Xisto; J. A. Leger; J. C. Páscoa; L. Gagnon; P. Masarati; D. Angeli; and A. Dumas (2017) Parametric Analysis of a Large-Scale Cycloidal Rotor in Hovering Conditions. *Journal of Aerospace Engineering*, Volume 30 Issue 1 – January 2017,
2. Dykas S. et al. Numerical and experimental investigation of the fan with cycloidal rotor. *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2018. – Т. 22. – №. 2.
3. Min S. Y. et al. Experimental Study of a Quadrotor Cyclocopter // *Journal of the American Helicopter Society*. – 2015. – Т. 60. – №. 3. – С. 1-10.
4. Halder A., Benedict M. Nonlinear Aeroelastic Coupled Trim Analysis of a Twin Cyclocopter in Forward Flight // *AIAA Journal*. – 2021. – Т. 59. – №. 1. – С. 305-319.

#### References

1. Carlos M. Xisto; J. A. Leger; J. C. Páscoa; L. Gagnon; P. Masarati; D. Angeli; and A. Dumas (2017) Parametric Analysis of a Large-Scale Cycloidal Rotor in Hovering Conditions. *Journal of Aerospace Engineering*, Volume 30 Issue 1 – January 2017,
2. Dykas S. et al. Numerical and experimental investigation of the fan with cycloidal rotor. *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2018. – Т. 22. – №. 2.
3. Min S. Y. et al. Experimental Study of a Quadrotor Cyclocopter // *Journal of the American Helicopter Society*. – 2015. – Т. 60. – №. 3. – С. 1-10.
4. Halder A., Benedict M. Nonlinear Aeroelastic Coupled Trim Analysis of a Twin Cyclocopter in Forward Flight // *AIAA Journal*. – 2021. – Т. 59. – №. 1. – С. 305-319.

© Дектерев А. А., Сентябов А. В., Дектерев Д. А., Вавилов Д. В., Дектерев Ар. А., 2023

УДК 533.6

## КОМПЛЕКС ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ МОДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д. А. Дектерев<sup>1,2\*</sup>, Ар. А. Дектерев<sup>1,2</sup>, Д. В. Вавилов<sup>1</sup>, Д. В. Платонов<sup>1,2</sup>, П. А. Необъявляющий<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, Красноярск, Свободный пр., 82А

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

\*E-mail: dekterev\_da@mail.ru

*В работе представляется описание экспериментальной базы в составе: замкнутой аэродинамической трубы, открытой аэродинамической стены, тензометрической платформы, оптической системы для измерения полей скоростей, основанной на трассерной визуализации, и дополнительного лабораторного оборудования, позволяющей проводить комплексные исследования аэродинамических и тягово-энергетических параметров летательных аппаратов, проводить отработку систем управления в различных режимах, а также организовывать имитацию летных испытаний в лабораторных условиях.*

*Ключевые слова: Аэродинамическая труба, аэродинамическая стена, трассерная визуализация (PIV), тензометрическая платформа.*

## COMPLEX OF LABORATORY EQUIPMENT FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF AERODYNAMICS OF MODEL OBJECTS

D. A. Dekterev<sup>1,2\*</sup>, Ar. A. Dekterev<sup>1,2</sup>, D. V. Vavilov<sup>1</sup>, D. V. Platonov<sup>1,2</sup>, P. A. Neobyavlyayushchiy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal Univrsity

82A, Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

1, Lavrentev ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation

\*E-mail: dekterev\_da@mail.ru

*The paper presents a description of the experimental complex consisting of: a closed wind tunnel, an open wind wall, a strain gauge platform, an optical system for measuring velocity fields based on tracer visualization, and additional laboratory equipment. It allows for comprehensive studies of the aerodynamic and traction-energy parameters of aircraft, carry out testing of control systems in various modes, as well as organize simulated flight tests in laboratory conditions.*

*Keywords: Wind tunnel, wind wall, Particle Image Velocimetry (PIV), strain gauge platform.*

Разработка летательных аппаратов, так же, как и их отдельных элементов, напрямую связана с оптимизацией аэродинамических параметров. В настоящее время большая часть исследований может проводиться с использованием численного моделирования, тем не менее, для верификации расчетов необходимы экспериментальные данные. Кроме этого, проведение модельных и натурных, в том числе трубных [1] экспериментов наряду с аэродинамическими параметрами позволяет получить данные о тягово-энергетических, прочностных характеристиках, конструктивных особенностях исследуемых объектов и корректности работы систем управления.

В аэродинамической лаборатории при Сибирском федеральном университете создан комплекс лабораторного оборудования для экспериментальных исследований аэродинамики модельных объектов в составе: замкнутой аэродинамической трубы, открытой аэродинамической стены, тензометрической платформы, оптической системы для измерения полей скоростей, основанной на трассерной визуализации.

Аэродинамическая труба закрытого типа с сечением рабочего участка 0,8x0,8 м и длиной 2,5 м. Поток создается осевым вентилятором ВО 25-188-12,5 мощностью 15 кВт. Скорость потока в рабочем участке варьируется от 0 до 30 м/с, регулирование происходит с помощью частотного преобразо-

вателя Vemper VR-100. Для выравнивания потока перед рабочим участком расположено профилированное сопло с выравнивающими конструкциями. Рабочий участок имеет оптически прозрачные стенки, что позволяет применять оптические методы исследования потоков, такие как: скоростная и лазерная визуализация, методы трассерного определения полей скорости PIV (Particle Image Velocimetry).

Для реализации метода PIV используются: скоростной лазер Pegasus с оптическими насадками, формирующими лазерный нож, скоростные камеры ImpreX, синхронизирующее устройство Polis и специализированное программное обеспечение ActualFlow. Засев потока производится с применением микронизированных полых частиц SiO<sub>2</sub> и компрессионного оборудования с устройством для взвихривания. Проведение трубных испытаний с применением современного метода PIV является отличительной особенностью лабораторного комплекса. Получение полей мгновенных и осредненных скоростей, пульсаций скорости и прочих характеристик в различных сечениях позволяют получить представление о степени перестроения потока при взаимодействии с изучаемыми моделями, кроме того интегральные характеристики позволяют производить более качественную настройку математических моделей, что является весьма важной задачей.

Для определения тяговых характеристик, подъёмной силы, и лобового сопротивления были разработаны специализированные весы на основе платформы Стюарта. Шесть тензометрических датчиков, установленных в разрыв стоек платформы обеспечивают определение трех компонент сил и моментов, действующих на поверхность платформы. Разработана система сбора, фильтрации и обработки данных с тензодатчиков. Точность измерения в стационарных условиях не превышает нескольких граммов (в зависимости от суммарной измеряемой величины).

Ещё одной аэродинамической установкой является так называемая аэродинамическая стена [2], выполненная в виде массива из 16 промышленных вентиляторов ВО-6-300 №4 0,75кВт/3000 об/мин. Диаметр вентилятора составляет 0,4 м, таким образом, с учетом монтажных элементов, при сборке массива выходное сечение аэродинамической стены равняется 3,7 м<sup>2</sup> (1,92x1,92 м). Каждый горизонтальный ряд (4 вентилятора) управляется частотным преобразователем EKF 4/5.5кВт, 3x400 ВЕКТОР-100, что позволяет изменять профиль выходного потока по вертикали или создавать пульсации скорости [3]. Суммарная потребляемая мощность оценивается в 12 кВт, при этом скорость формирующего потока достигает 10 м/с. При использовании конфузора, уменьшающего выходное сечение до 1,5x1,5 м, скорость потока достигает 15 м/с. Аэродинамическая стена позволяет проводить наземные, стендовые, привязные и ряд летных испытаний летательных аппаратов в лабораторных условиях, что в значительной мере ускоряет процесс отладки и тестирования разрабатываемых систем.

Совместное использование описанных систем в дополнении прочего лабораторного оборудования позволяет решать широкий класс экспериментальных задач, связанных с разработкой и тестированием летательных аппаратов и их систем управления.

### Библиографические ссылки

1. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении //Л.: Машиностроение. – 1974. – Т. 480.
2. Дектерев А.р А., Дектерев А. А., Дектерев Д. А. Пиксельная аэродинамическая труба // XXXVIII Сибирский теплофизический семинар, посвященный 65-летию Института теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых. Труды конференции, Новосибирск, 29–31 августа 2022 года. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, – 2022. – С.73-76
3. Noca F. et al. Wind and weather facility for testing free-flying drones //AIAA Aviation 2019 Forum. – 2019. – С. 2861.

### References

1. Povh I. L. Aerodinamicheskiiy experiment v mashinostroenii [Aerodynamic experiment in mechanical engineering] //L.: Mashinostroenie. – 1974. – 480 p. (In Russ.)
2. Dekterev Ar. A., Dekterev A.A., Dekterev D. A. Pixelnaya aerodinamicheskaya stena [Pixel aerodynamic wall]//Materials of conference STS XXXVIII, Novosibirsk, 2022. p. 73-76. (In Russ.)
3. Noca F. et al. Wind and weather facility for testing free-flying drones //AIAA Aviation 2019 Forum. – 2019. – С. 2861

УДК 539.374

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ИДЕАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

Д. О. Евтихов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 660037, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: devtikhov@yandex.ru

*Рассмотрено решение задачи Коши для двумерных уравнений идеальной пластичности с применением законов сохранения.*

*Ключевые слова: идеальная пластичность, задача Коши, построение характеристик.*

## NUMERICAL-ANALYTICAL SOLUTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR IDEAL PLASTICITY

D. O. Evtikhov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: devtikhov@yandex.ru

*The solution of the Cauchy problem for two-dimensional equations of ideal plasticity with the application of conservation laws is considered.*

*Keywords: ideal plasticity, Cauchy problem, construction of characteristics.*

Задача Коши – одна из основных задач теории дифференциальных уравнений, состоит в нахождении решения интеграла дифференциального уравнения, удовлетворяющего так называемым начальным данным.

Ставим задачу Коши для системы пластичности, определяющей напряжённое состояние пластичной среды при плоской деформации в квазилинейной форме Леви (1)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - 2k \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \cos 2\theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin 2\theta \right) &= 0 \\ \frac{\partial \sigma}{\partial y} - 2k \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \sin 2\theta - \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos 2\theta \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Задача может быть решена методом, на основе законов сохранений предложенным в работах [1-5]. Поставим задачу Коши для системы пластичности (1).

В плоскости переменных  $x, y$  задана линия  $L: y=0, S \leq x \leq P$ . Предполагается, что линия  $L$  не является характеристикой системы уравнений Леви и каждая характеристика этой системы пересекает ее только один раз [4]. На  $L$  заданы гладкие функции  $\sigma = \sigma(x), \theta = \theta(x)$ , которые непрерывны вместе со своими первыми и вторыми производными. Необходимо найти решение системы (1) в окрестности  $L$ . Зададим на  $L$  точки  $S, P$ . Выпустив характеристику  $PR: \xi_0 = \text{const}$  из точки  $P$  и характеристику  $RS: \eta_0 = \text{const}$  из некоторой точки  $S$ . До их пересечения в точке  $R$  тогда решения задачи, Коши определено в криволинейном треугольнике  $\Delta SPR$  (Рис. 1)

$$\sigma|_{SP} = \sigma_0, \theta|_{SP} = \theta_0 \quad (2)$$

Необходимо определить координаты точки R пересечения характеристик. Зная координаты точки R можно построить линии скольжения образованные данными точками для задачи Коши.

Для решения задачи Коши для идеальной пластичности с применением законов сохранения, нами была произведена расчеты в среде Maple. Для расчетов мы использовали начальные данные (2)

$$\sigma|_{SP} = \sigma_0 = -x^2, \theta|_{SP} = \theta_0 = -\frac{\pi}{4} \quad (2)$$

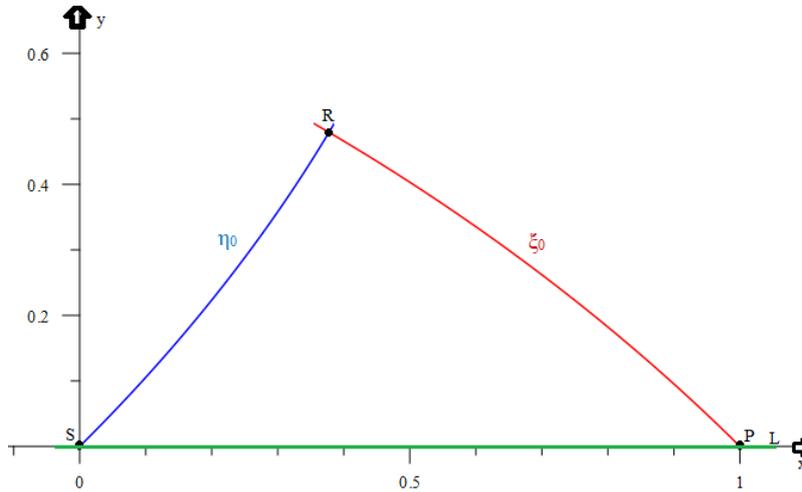


Рис. 1 – задача Коши

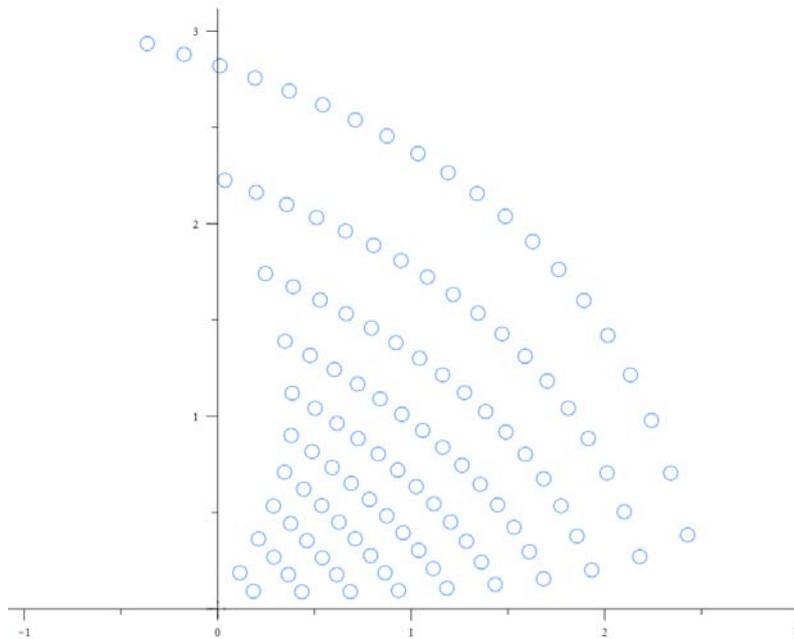


Рис. 2 – точки R при начальных данных (2)

Таким образом, мы видим, что условия задачи Коши выполняются и ее можно считать решённой.

Однако не для всех начальных данных условия задачи выполняются, характеристики одного семейства могут пересекаться и также пересекать линию L более одного раза. Эта проблема будет рассмотрена в последующих работах.

### Библиографические ссылки

1. Сенашов С.И. О законах сохранения уравнений пластичности// Докл. АН СССР. – 1991. –Т. 320, №3. –С. 606-608
2. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения для решения дифференциальных уравнений. Новосибирск : СОРАН, 2001. 192 с.
3. Senashov S. I., Vinogradov A. M. Symmetries and conservation Laws of 2-dimensional equations of ideal plasticity // Proc. Edinburg Math. Soc. 1988. Vol. 31. P. 415–439
4. Предельное состояние деформированных тел и горных пород / Д. Д. Ивлев [и др.]. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 831 с
5. Математические вопросы двумерных уравнений идеальной пластичности : монография / С. И. Сенашов, О. В. Гомонова, А. Н. Яхно ; М-во образования и науки Российской Федерации, Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М. Ф. Решетнева. – Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический ун-т, 2012. – 137 с

### References

1. Senashov S.I. On the laws of conservation of plasticity equations// Dokl. USSR Academy OF Sciences. – 1991. –Vol. 320, No. 3. –pp. 606-608
2. Kiryakov P. P., Senashov S. I., Yakhno A. N. Application of symmetries and conservation laws for solving differential equations. Novosibirsk : SB RAS, 2001. 192 p.
3. Senashov S. I., Vinogradov A. M. Symmetries and conservation Laws of 2-dimensional equations of ideal plasticity // Proc. Edinburg Math. Soc. 1988. Vol. 31. P. 415–439
4. The limiting state of deformed bodies and rocks / D. D. Ivlev [et al.]. M. : FIZMATLIT, 2008. 831 p.
5. Mathematical issues of two-dimensional equations of ideal plasticity : monograph / S. I. Senashov, O. V. Gomonova, A. N. Yakhno ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev. – Krasnoyarsk : Siberian State Aerospace University, 2012. – 137 p.

© Евтихов Д. О., 2023

УДК 539.3

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБИТИЯ ЛЕДЯНОГО БЛОКА, ЗАЩИЩЕННОГО ТОНКИМ СТАЛЬНЫМ СЛОЕМ\*

М. Ю. Орлов, В. П. Глазырин, Т. В. Фазылов

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, Томск, просп. Ленина, 36 корп. 10  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

*При помощи некоммерческого программного комплекса смоделировано сквозное пробитие ледяного блока с расположенной на нем тонкой стальной пластиной. Поведение материалов описано с позиций феноменологической макроскопической теории сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Расчеты проведены в двумерной осесимметричной постановке при помощи модифицированного лагранжева метода. Результаты расчетов получены в виде исходных, текущих и конечных конфигураций, а также графиков и таблиц. Выявлены некоторые особенности процесса разрушения, включая зарождение и рост очагов разрушения во льду, время пробития, давление в ударнике и некоторых контрольных точках.*

*Ключевые слова:* лед, удар, пробитие, разрушение,

## NUMERICAL MODELING OF THE ICE BLOCK PENETRATION PROCESS PROTECTED BY A THIN STEEL LAYER

M. Yu. Orlov, V. P. Glazyrin, T. V. Fazylov

National Research Tomsk State University,  
36, Lenin prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

*The process of perforating an ice block with a thin steel plate placed on it was conducted through numerical modeling. The behavior of materials is described from the perspective of a phenomenological macroscopic theory of continua, based on fundamental conservation laws. Calculations were performed in a two-dimensional axisymmetric setup using a modified Lagrangian method. The calculation results are presented in the form of initial, intermediate, and final configurations, as well as graphs and tables. Some features of the destruction process were identified, including the initiation and growth of damage spots in the ice, penetration time, pressure on the striker, and at certain control points.*

*Keywords:* ice, impact, penetration, fracturing,

В настоящее время актуальной и сложной научной задачей является изучение поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. Актуальность исследований обусловлена созданием эффективных ударостойких защит различных элементов ракетно-космической техники, а также необходимостью развития северных территорий. С точки зрения математического моделирования, процесс разрушения льда представляет научный интерес в тех случаях, когда лед фигурирует в ударниках и преградах. Достоверно известно, что лед это древнейший природный материал, который мало изучен в условиях удара и взрыва. Это объясняется его сложной внутренней структурой, наличием фазовых переходов, аномальными пластическими свойствами, и т.п. Модели разрушения льда все еще разрабатываются и, на наш взгляд, далеки от совершенства [1].

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00257, <https://rscf.ru/project/23-29-00257>.

В настоящей работе смоделирован процесс пробития ледяного блока защищенного тонкой стальной пластиной. В качестве ударника рассмотрен компактный стальной элемент. Скорость начального взаимодействия превысила предельную баллистическую скорость для данного ударника и конструкции.

Поведение материалов описывается упруго-пластической моделью механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Соударяющиеся тела моделируются пористой, сжимаемой средой с учетом ударно-волновых явлений и фрагментарного разрушения материалов по отрывному и сдвиговому механизмам. Определяющие соотношения задаются уравнениями Прандтля и Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнения состояния выбрано в форме Уолша. Система уравнения решается в двумерном осесимметричном случае при помощи численного лагранжева метода Г.Р. Джонсона. В качестве основного инструмента исследований используется некоммерческий оригинальный программный комплекс «Удар. Ос.1» [2].

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач и мониторингом энергии в замкнутой системе «ударник – преграда». Были решены тестовые задачи о фронтальном соударении двух одинаковых цилиндров, об ударе тонкой металлической пластины по толстой мишени, об ударе металлического стержня по жесткой стенке (тест Тейлора) и о пробитии монолитных, двухслойных и разнесенных стальных преград. Расхождение с экспериментальными данными и результатами численного моделирования были не более 10% [2].

Физическая постановка задачи формулируется как контактное взаимодействие 5 мм стального шарика с ледяным цилиндром, размерами в сечении (30×30) мм. Ледяной блок был защищен 1 мм стальной пластиной. Рассматривалась низколегированная сталь марки Сталь 3. Серия вычислительных экспериментов состояла из трех вариантов расчетов. Начальные скорости были равными 500, 750 и 1000 м/с. Физико-механические характеристики льда и других материалов взяты из [3, 4]. На рис.1 показаны начальная и конечная конфигурации, полученные после удара шарика со скоростью 1000 м/с.

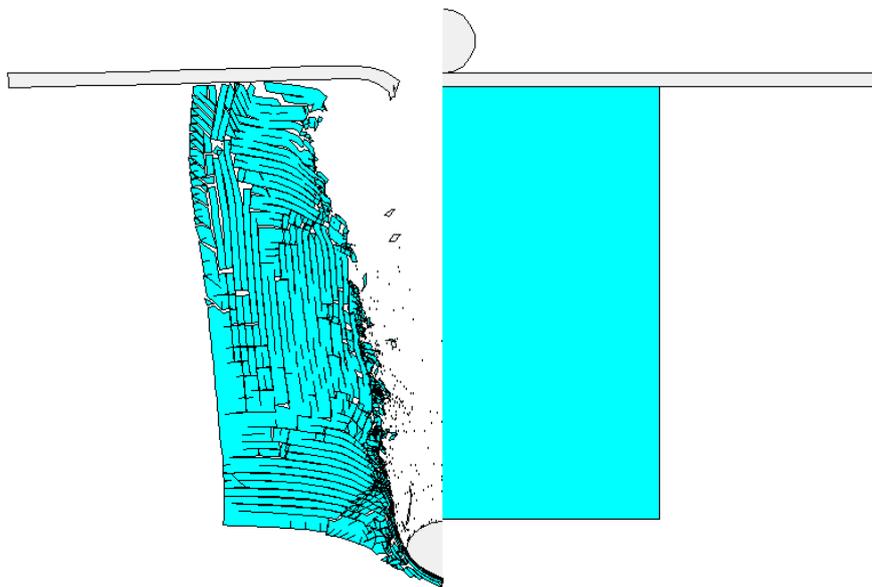


Рис. 1. Поперечное сечение ударника и ледяного цилиндра в моменты времени 80 и 0 мкс при 1000 м/с

Было установлено, что во всех случаях ледяной блок был разрушен, а пластина пробита насквозь. Первые очаги разрушения зафиксированы уже на 2-й мкс процесса. По мере прохождения ударника вглубь блока, область разрушения льда только увеличивается, а кратер в нем приобретает V-образную форму. Видно, что ударник пластически деформируется после взаимодействия с пластиной без каких-либо видимых разрушений. Таким образом, при помощи разработанного программного комплекса смоделирован процесс пробития компактным ударником ледяного блока, защищенного тонкой стальной пластиной в указанном диапазоне начальных условий нагружения.

**Библиографические ссылки**

1. Гриневич, Д. В. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда / Д. В. Гриневич, В. М. Бузник, Г. А. Нужный // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8(90). – С. 109-122. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122.
2. Фазылов, Т. В. Численное моделирование процесса соударения тонких и толстых металлических пластин (< 400 м/с) / Т. В. Фазылов, М. Ю. Орлов // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2021 : Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием, Томск, 17–21 ноября 2021 года / Под редакцией М.Ю. Орлова. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2022. – С. 121-124.
3. Исследование пробития ледовой преграды цилиндрическим ударником / С. И. Герасимов, А. В. Зубанков, О. В. Кривошеев [и др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2020. – Т. 9. – № 2. – С. 95-99. – DOI 10.1134/S2304487X20020042.
4. Проникание твердого цилиндрического тела в сплошной и ослабленный отверстием лед / В. А. Велданов, А. Л. Исаев, С. В. Ладов, С. В. Федоров // Оборонная техника. – 2002. – № 11. – С. 46-51.
5. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / А. В. Герасимов, В. П. Глазырин, С. А. Зелепугин [и др.] ; под редакцией А.В.Герасимова. – Томск : Издательство научно-технической литературы, 2016. – 568 с. – ISBN 978-5-89503-576-4. – EDN XDHYYN.

**References**

1. Grinevich, D. V., Buznik, V. M., and Nuzhny, G. A. (2020) A review of the application of numerical methods for modeling the deformation and destruction of ice // Proceedings of VIAM. 8(90). -pp. 109-122. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122.
2. Fazylov, T. V., Orlov M. Yu. (2022) Numerical modeling of the impact process of thin and thick metal plates (< 400 m/s) // Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2021: Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with International Participation, Tomsk, November 17–21, 2021 / Edited by M.Yu. Orlov. – Tomsk: National Research Tomsk State University, pp. 121-124.
3. Gerasimov, S.I., Zubankov, A.V., Krivosheev, O.V. [et al.] (2020) Studying the penetration of an ice target by a cylindrical striker, Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI. – Vol. 9(2). – P. 95-99. – DOI 10.1134/S2304487X20020042.
4. Veldanov V. A., Isaev A. L., Ladov S. V., Fedorov S. V. (2022) Penetration of a solid cylindrical body into ice solid and weakened by a hole. Vol. 11. pp. 46-51
5. High speed kick. Modeling and experiment / A. V. Gerasimov, V. P. Glazyrin, S. A. Zelepugin [etc.] ; edited by A.V. Gerasimov. – Tomsk: Publishing house of scientific and technical literature, 2016. – 568 p. – ISBN 978-5-89503-576-4. – EDN XDHYYN.

© Орлов М. Ю., Глазырин В. П., Фазылов Т. В., 2023

УДК 539.3

## УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТОЙ ОРТОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ СО СВОБОДНЫМ КРАЕМ

О. И. Рабецкая, А. В. Лопатин \*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lopatin@sibsau.ru

*В работе представлено аналитическое решение задачи устойчивости SSCF ортотропной цилиндрической панели, нагруженной сжимающими усилиями. Для решения этой задачи был рассмотрен функционал, соответствующий принципу Лагранжа, и применен метод Рунца.*

*Ключевые слова: ортотропная цилиндрическая панель, потеря устойчивости.*

## BUCKING OF COMPRESSED ORTHOTROPIC CYLINDRICAL PLATE WITH FREE EDGE

O. I. Rabetskaya, A. V. Lopatin \*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lopatin@sibsau.ru

*This paper presents an analytical solution of the buckling problem of the SSCF orthotropic cylindrical panel loaded by compressive forces. To solve this problem, the functional corresponding to the Lagrange principle was considered and the Ritz method was applied.*

*Keywords: orthotropic cylindrical panel, buckling.*

Ортотропные цилиндрические панели, состоящие из композитных слоев, обладают высокой изгибной жесткостью и небольшой погонной массой. Композитные цилиндрические панели широко используются в конструкциях авиационной, космической и корабельной техники, подвергающихся действию сжимающих нагрузок. Поэтому важным этапом проектирования этих панелей является анализ устойчивости. Задачи определения критических усилий цилиндрических панелей привлекали внимание многих исследователей [1]-[6] на протяжении длительного времени.

В работе представлено аналитическое решение задачи устойчивости SSCF ортотропной цилиндрической панели, нагруженной сжимающими усилиями. Для решения этой задачи был рассмотрен функционал, соответствующий принципу Лагранжа, и применен метод Рунца. На первом этапе решения задачи устойчивости был использован метод Фурье, позволяющий понизить размерность исходного функционала. Аппроксимация изменения кинематических переменных между свободно-закрепленными краями панели была выполнена с помощью традиционных тригонометрических функций. На втором этапе решения задачи устойчивости SSCF ортотропной панели изменение кинематических переменных от закрепленного края до свободного края аппроксимировалось балочными функциями [7]. Выбранные аппроксимирующие функции удовлетворяют кинематическим граничным условиям на закрепленном краю панели. Статические граничные условия на свободном краю панели, при использовании метода Рунца, удовлетворялись приближенно. Такой подход к решению рассматриваемой задачи устойчивости позволил получить для определения критического усилия аналитическую формулу. Верификация формулы была выполнена с помощью метода конечных элементов [8]. Использование полученной формулы было продемонстрировано в нескольких примерах по выбору оптимальных параметров SSCF ортотропной цилиндрической панели.

### Библиографические ссылки

1. Vasiliev VV. Mechanics of composite structures. Washington: Taylor & Francis; 1993.
2. Vasiliev VV, Morozov EV. Advanced mechanics of composite materials and structural elements, 3rd edition. Amsterdam: Elsevier; 2013.
3. Leissa AW. Buckling of laminated composite plates and shell panels. Technical report AFWAL-TR-85-3069; 1985.
4. Hu HT, Yang JS. Buckling optimization of laminated cylindrical panels subjected to axial compressive load. Composite Structures 2007;81:374–385.
5. Shahab S, Mirzaeifar R, Bahai H. Coupled modification of natural frequencies and buckling loads of composite cylindrical panels. International Journal of Mechanical Sciences 2009;51:708–717.
6. Lal A, Singh BN, Kale S. Stochastic post buckling analysis of laminated composite cylindrical shell panel subjected to hygrothermomechanical loading. Composite Structures 2011;93:1187–1200.
7. Blevins RD. Formulas for natural frequency and mode shape. Malabar, FL:Krieger Publishing Company; 2001.
8. MSC Nastran. Quick reference guide's: MSC. Software Corporation; 2011.

### References

1. Vasiliev VV. Mechanics of composite structures. [Механика композитных конструкций]. Washington: Taylor & Francis; 1993.
2. Vasiliev VV, Morozov EV. Advanced mechanics of composite materials and structural elements [Механика композиционных материалов и элементов конструкций], 3rd edition. Amsterdam: Elsevier; 2013.
3. Leissa AW. Buckling of laminated composite plates and shell panels. [Выпучивание слоистых композитных пластин и панелей]. Technical report AFWAL-TR-85-3069; 1985.
4. Hu HT, Yang JS. Buckling optimization of laminated cylindrical panels subjected to axial compressive load [Оптимизация потери устойчивости слоистых цилиндрических панелей, подвергающихся осевой сжимающей нагрузке]. Composite Structures 2007; 81:374–385.
5. Shahab S, Mirzaeifar R, Bahai H. Coupled modification of natural frequencies and buckling loads of composite cylindrical panels [Совместное изменение собственных частот и продольных нагрузок композитных цилиндрических панелей]. International Journal of Mechanical Sciences 2009; 51:708–717.
6. Lal A, Singh BN, Kale S. Stochastic post buckling analysis of laminated composite cylindrical shell panel subjected to hygrothermomechanical loading [Стохастический анализ после выпучивания ламинированной композитной цилиндрической панели оболочки, подвергнутой гигротермомеханическому нагружению]. Composite Structures 2011;93:1187–1200.
7. Blevins RD. Formulas for natural frequency and mode shape [Формулы для определения собственной частоты колебаний и формы моды]. Malabar, FL:Krieger Publishing Company; 2001.
8. MSC Nastran. Quick reference guide's: MSC [Nastran: краткое справочное руководство]. Software Corporation; 2011.

УДК 539.3

## К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЫБРОСА РЕЛЬСОВОЙ ПЛЕТИ

Р. А. Сабиров, С. И. Сенашов, О. В. Гомонова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: rashidsab@mail.ru

*Рассматривается задача о выбросе бесстыковой рельсовой плети. Задача поиска критических температур сформулирована как проблема собственных чисел.*

*Ключевые слова: устойчивость стержней, выброс железнодорожной плети.*

## ON MODELING OF LONG-WELDED RAILS EJECTION

R. A. Sabirov, S. I. Senashov, O. V. Gomonova

Reshetnev Siberian State Aerospace University  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: rashidsab@mail.ru

*The problem of ejection of long-welded rails is considered. The problem of critical temperatures finding is formulated as an eigenvalue problem.*

*Keywords: stability of the rods, ejection of the long-welded rails.*

**Введение.** Процесс доставки изделий космического назначения многоступенчатый. Крупные детали, космические аппараты и ракеты-носители прибывают с заводов к космодрому по железным дорогам *общего пользования* [1]. Около 73% от общей протяженности дорог путь является бесстыковым. Это составляет 91 тыс. км длины главных путей ОАО «РЖД» [2]. Основное отличие деформирования бесстыкового пути от обычного звеньевое состоит в том, что в рельсовых плетях действуют значительные продольные усилия, вызываемые изменениями температуры. При повышении температуры рельсовых плетей по сравнению с температурой закрепления в них возникают продольные силы сжатия, которые могут создать опасность выброса пути (рис. 1) [2]. В мире зафиксировано порядка 90 случаев выбросов бесстыковых железнодорожных путей под действием продольных температурных и поездных сил, поэтому предотвращение этого явления является актуальной задачей. Случаи потери устойчивости за 2003–2016 гг. составляют порядка 10 в год [3].

Впервые идею устройства железнодорожного пути без стыков высказал в России инженер И. Ф. Стецевич ещё в 1896 году. Он предложил укладывать путь с волнообразным в плане искривлением и за счёт изменения стрел этих искривлений периодически производить удлинение или укорочение плети, снижая величины продольных сжимающих или растягивающих сил. Исследования и изыскания по контролю устойчивости рельсовой колеи, позволяющие корректировать определенные указания нормативной базы, востребованы и по сей день [4]. Из множества методик назовем применение компьютерного моделирования на основе МКЭ и использование нейронных сетей [3, 5]. Однако теоретическое описание процесса выброса для реальных условий требует дополнительных исследований и измерений характеристик, определяющих механические свойства балластной призмы, рельсов, взаимодействия шпальной решетки с балластом.

**Постановка задачи вычисления приращения критической температуры закрепления модели рельсового полотна.** Выпишем из [6] вариационное уравнение:

$$\int_{x=0}^{x=l} EJ(x) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \frac{d^2 \delta w(x)}{dx^2} dx = \int_{x=0}^{x=l} N(x) \frac{dw(x)}{dx} \frac{d\delta w(x)}{dx} dx, \quad (1)$$

в котором  $E$  – модуль Юнга, а  $J(x)$  – осевой момент инерции модели полотна,  $w(x)$  – функция прогиба,  $\delta w(x)$  – вариация функции прогиба. Параметр  $N(x) = ES \alpha \Delta T(x)$  является критической силой

(выражен через продольную жесткость  $ES$ ),  $S$  – площадь поперечного сечения,  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения;  $\Delta T(x)$  – разность между (полевой) максимальной температурой в регионе и температурой закрепления рельсов.



Рис. 1. Фотографии выброса путей  
(фотографии имеют свободный доступ в Интернете [2])

Аппроксимацию уравнения (1) реализуем методом конечных разностей, приняв шаг сетки  $\lambda = l/n$ , здесь  $l$  – длина ветви,  $n$  – число шагов. Дискретная задача (1) позволяет найти конечное число критических температур:

$$\Delta T = \frac{J \text{ sob}}{S \alpha \lambda^2} = \frac{i^2 \text{ sob}}{\alpha \lambda^2} = \frac{i^2 \text{ sob} n^2}{\alpha l^2} = \frac{\text{sob} n^2}{\alpha \eta^2}. \quad (2)$$

Здесь:  $\text{sob}$  – собственное число,  $i^2 = J/S$  – квадрат радиуса инерции,  $\eta = l/i$  – гибкость.

Рассмотрим потерю устойчивости модели в горизонтальной плоскости. Выберем рельсы Р65 [4], осевой момент инерции которых относительно вертикальной оси равен  $J_y = 665 \text{ см}^4$ ,  $S = 95 \text{ см}^2$ . Вычислим  $J(x) = 2J_y + 2S(1,520/2)^2 = 0,01099 \text{ м}^4$  – здесь 1,520 расстояние между рельсами в м;  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ;  $\alpha = 0,0000118/1^\circ \text{ C}$ .

**Расчет.** Пусть шпальные ящики пустые. Рельсы не закреплены. Первые четыре собственных числа такие: 0,05; 0,198; 0,44; 0,753, им соответствуют следующие критические температуры  $\Delta T$  для километровой рельса:  $0,96^\circ \text{ C}$ ;  $3,8^\circ \text{ C}$ ;  $8,4^\circ \text{ C}$ ;  $14,5^\circ \text{ C}$  – постоянные по всей длине. Формы потери устойчивости модели пути покажем на рис. 2. На рис. 2а представим форму потери устойчивости, отвечающую критическому приращению температуры  $0,96^\circ \text{ C}$ . Обозначим длину пути символами  $AB$ . Отрезки  $AC$  и  $DB$  называют “дышащими” [4]. Следуя левой фотографии рисунка 1, дышащие отрезки закрепим и рассмотрим потерю устойчивости отрезка  $CD$  длиной 357 м (рис. 2б). Шаг сетки  $n = 25,5 \text{ м}$ .

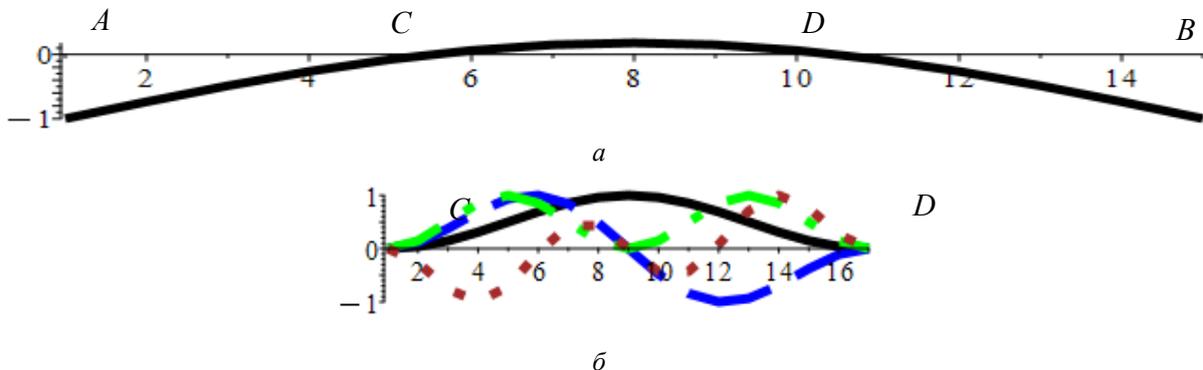


Рис. 2. Формы потери устойчивости:

- а) первая форма потери устойчивости модели пути длиной один километр, отвечает критическому приращению температуры  $0,96^\circ \text{ C}$ ; б) формы выброса опасного участка пути: сплошная линия (черный цвет) если  $\Delta T = 23^\circ \text{ C}$ , штриховая линия (синий цвет) если  $\Delta T = 46^\circ \text{ C}$ , штрихпунктирная линия (зеленый цвет) при  $\Delta T = 88^\circ \text{ C}$ , точечная линия (коричневый цвет) при  $\Delta T = 129^\circ \text{ C}$ .

Первым низшим четырьмя собственными числами: 0,15; 0,31; 0,59; 0,86 соответствуют критические температуры  $\Delta T$ :  $23^{\circ}\text{C}$ ;  $46^{\circ}\text{C}$ ;  $88^{\circ}\text{C}$ ;  $129^{\circ}\text{C}$ . При этих температурах развиваются усилия и напряжения, равные, соответственно: 514 кН и 54 МПа, 1033 кН и 108,7 МПа, 1979 кН и 208 МПа, 2897 кН и 305 МПа.

**Вывод.** Учесть наполнение шпальных ящиков и качество их трамбовки, сопротивление балластной призмы можно путем увеличения жесткости  $J(x)$ . Однако в линейной модели пропорционально увеличатся критические температуры, усилия и напряжения.

### Библиографические ссылки

1. Космос и железные дороги: точки соприкосновения. Scienceforum.ru>2017/article/ 2017033429.
2. Бесстыковой путь – Википедия (wikipedia.org)
3. Суслов О.А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути: автореферат доктора техн. наук. М., 2017. 48 с.
4. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (утв. распоряжением ОАО "РЖД" от 14.12.2016, N 2544 р).
5. Новакович В.И., Залавский Н.И., Карпачевский В.В., Шубитидзе В.В. О контроле устойчивости бесстыкового пути//Транспортное строительство. № 06/2017. С. 14 – 17.
6. Кубышкина Д.Р., Сабиров Р.А. Моделирование устойчивых равновесных форм незакрепленных стержней в курсе сопротивление материалов. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т. Том 1. Красноярск, 2021. С. 372 – 374.

### References

1. *Kosmos i zheleznye dorogi: tochki soprikosnoveniya*. [Space and railways: points of contact] Scienceforum.ru> 2017/article/ 2017033429.
2. *Besstykovoj put'* [Long-welded rail] – Vikipediya (wikipedia.org)
3. Suslov O. A. *Funkcionalnaya bezopasnost' ekspluatatsii besstykovogo puti* [Functional safety of a long-welded rail exploitation]: avtoreferat d-ra tekhn. nauk. M., 2017.48 p.
4. *Instrukciya po ustroystvu, ukladke, sodержaniyu i remontu besstykovogo puti* [Directions on device, laying, maintenance and repair of long-welded rails] (utv. Rasporyazheniem ОАО "RZHD" от 14.12.2016, N 2544 r).
5. Novakovich V. I., Zalavskij N. I., Karpachevskij V. V., Shubitidze V. V. *O kontrole ustoychivosti besstykovogo puti* [About the control of a long-welded rail stability] // Transportnoe stroitel'stvo. № 06/2017. P. 14 – 17.
6. Kubyshkina D. R., Sabirov R. A. *Modelirovanie ustojchivyh ravnovesnyh form nezakreplennyh stержnej v kurse soprotivleniya materialov*. [Modeling of the stable equilibrium forms of simply supported rods in the strength of materials course] Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Dnyu kosmonavtiki: v 3 t. Tom 1. Krasnoyarsk, 2021.P. 372 – 374.

© Сабиров Р. А., Сенашов С. И., Гомонова О. В., 2023

УДК 539.374

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ КОНСОЛИ**

С. И. Сенашов\*, И. Л. Савостьянова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: sen@sibsau.ru

*Рассмотрена консоль, состоящая из двух слоев, нагруженная постоянной силой на свободном конце. Каждый слой изготовлен из материалов, имеющих различные упругие свойства. Вариационным методом найдены оптимальные толщины упругих слоев. При этом минимизирована полная работа внешних сил по преодолению внутренних сил.*

*Ключевые слова: композитные материалы, законы сохранения, упруго-пластичность*

**STRESS-STRAIN STATE OF AN INHOMOGENEOUS CONSOLE**

S. I. Senashov\*, I. L. Savostyanova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: sen@sibsau.ru

*A console consisting of two layers loaded with a constant force at the free end is considered in this article. Each layer is made of materials having different elastic properties. The optimal thicknesses of elastic layers are found by the variational method. At the same time, the full work of external forces to overcome internal forces is minimized.*

*Keywords: composite materials, conservation laws, elastoplasticity*

Рассмотрим консоль длины  $l$ , толщины  $H$ , состоящую из двух слоев, имеющих толщины  $h_1, h_2$  соответственно, при этом  $h_1 + h_2 = H$ . Слои изготовлены из разных материалов с упругими характеристиками  $\nu_1, E_1$  и  $\nu_2, E_2$ . Слои жестко соединены вдоль линии  $y = 0$ .

В этом случае напряженное состояние консоли может быть описано соотношениями [1]:

$$\tau = -d/2(y^2 - (h_1 - h_2)y - h_1h_2), \sigma_x = dxy + d/2(h_1 - h_2)x, \sigma_y = 0, \tag{1}$$

где  $d$  - произвольная постоянная.

Предположим, что верхняя и нижние стороны консоли свободны от напряжений, это означает, что

$$\sigma_y n_1 + \tau n_2 |_{y=h_1} = 0, \sigma_y n_1 + \tau n_2 |_{y=-h_2} = 0, \tag{2}$$

где  $n = (n_1, n_2)$  - вектор внешней нормали к сторонам.

Из (2) следует, что

$$\tau |_{y=h_1} = 0, \tau |_{y=-h_2} = 0.$$

Из (1) следует, что эти условия выполнены. На свободном конце консоли подвешен груз весом  $P$ . Удовлетворим этому условию следующим образом

$$P = \int_{-h_2}^{h_1} \tau dy. \tag{3}$$

Из (3) получаем  $P = -\frac{dH^3}{12}$ . Следовательно  $d = -\frac{12P}{H^3}$ .

Теперь найдем компоненты вектора смещений. Для первого слоя имеем

$$\partial_x u^+ = \frac{1}{E_1}(\sigma_x - \nu_1 \sigma_y), \partial_y v^+ = -\frac{1}{E_1} \nu_1 \sigma_x, \partial_y u^+ + \partial_x v^- = \frac{1 + \nu_1}{E_1} \tau. \tag{4}$$

Для нижнего слоя формулы будут аналогичные, только у компонент вектора перемещений будет знак минус и упругие постоянные будут  $\nu_2, E_2$ . Интегрируя уравнения (4) получаем для верхнего слоя

$$u^+ = \frac{d}{E_1}(x^2 y / 2 + (H - 2h)x^2 / 4 - y^3 / 6 + (2h - H)y^2),$$

$$v^+ = -\frac{d\nu_1}{E_1}(y^2 x / 2 + (H - 2h)xy / 2 + \frac{1}{\nu_1}(x^3 / 6 + (1 + \nu_1)(h - H)hx)).$$

Аналогичные формулы получаем для нижнего слоя

$$u^- = \frac{d}{E_2}(x^2 y / 2 + (H - 2h)x^2 / 4 - y^3 / 6 + (2h - H)y^2),$$

$$v^- = -\frac{d\nu_2}{E_2}(y^2 x / 2 + (H - 2h)xy / 2 + \frac{1}{\nu_2}(x^3 / 6 + (1 + \nu_2)(h - H)hx)).$$

В формулах (5) и (6), для удобства дальнейших вычислений, заменено  $h_2 = H - h$ ,  $h_1 = h$ . Из условия на контакте при  $y = 0$ , должны выполняться условия  $u^+ = u^-$ ,  $v^+ = v^-$  из них следует  $E_1 = E_2 = E$ .

Для оптимального распределения толщин  $h_1, h_2$  рассмотрим упругий потенциал. В плоском случае он имеет вид

$$V = \int_0^l \int_0^h \left( \frac{1}{E}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \frac{\nu_1}{E}\sigma_x\sigma_y + \frac{1+\nu_1}{E}\tau^2 \right) dx dy + \int_0^l \int_{h-H}^0 \left( \frac{1}{E}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \frac{\nu_2}{E}\sigma_x\sigma_y + \frac{1+\nu_2}{E}\tau^2 \right) dx dy. \quad (7)$$

Как известно, упругий потенциал равен полной работе внешних сил по преодолению внутренних сил, совершаемую при нагружении. Из вариационного принципа следует, что для действительного поля напряжений этот функционал должен иметь абсолютный минимум.

Вычислим производную от (7), пользуясь формулой дифференцирования собственного интеграла по параметру. Имеем

$$\frac{dV}{dh} = (1 + \nu_1) \frac{dh}{4} \left( h^2 - \frac{3}{2}hH + H^2 / 2 \right) - (1 + \nu_2) \frac{d^2(H - h)^2}{4} \left( -7h^2 - \frac{15}{2}hH + 2H^2 \right). \quad (8)$$

Построим график функции (8) при  $H = 50, \nu_1 = 1,31, \nu_2 = 1,25$ , получаем

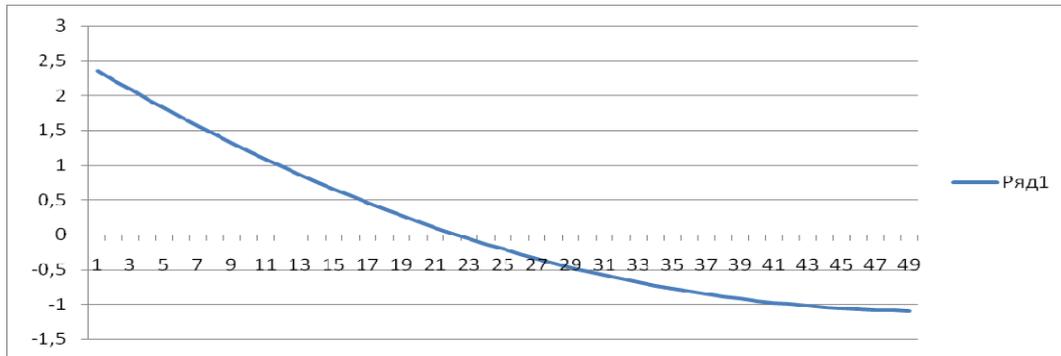


Рис. 1. График функции

Это решение соответствует консоли состоящей из двух слоев стали с коэффициентами Пуассона 1,31 и 1,25. При этом толщина первого слоя равна примерно 22, а второго 28.

#### Библиографическая ссылка

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М., Наука, 1978.

#### Reference

1. Timoshenko S. P., Goodyear J. *Teoriya uprugosti* [The theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1978.

УДК 539.3

## О РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ УПРУГОСТИ В ДИНАМИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

С. И. Сенашов\*, И. Л. Савостьянова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: sen@sibsau.ru

*Рассмотрены уравнения упругости в плоском динамическом случае. Эта система заменена равносильной системой дифференциальных уравнений первого порядка. Равносильная система есть групповое расщепление исходной системы уравнений, она является объединением разрешающей и автоморфных систем. Для разрешающей системы уравнений найдены специальные классы законов сохранения, которые позволили найти решение исходных уравнений в виде поверхностных интегралов по границе упругого тела.*

*Ключевые слова: уравнения упругости в плоском динамическом случае, задача Коши, законы сохранения, точные решения.*

## ON THE SOLUTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR ELASTICITY EQUATIONS IN THE DYNAMIC CASE

S. I. Senashov\*, I. L. Savostyanova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt,  
Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sen@sibsau.ru

*We have considered the elasticity equations in the plane dynamic case in this paper. The system was replaced by an equivalent system of first-order differential equations. An equivalent system is a group bundle of the original system of equations, it is a union of resolving and automorphic systems. For the resolving system of equations, special classes of conservation laws were found, which made it possible to find a solution to the initial equations in the form of surface integrals along the boundary of an elastic body.*

*Keywords: elasticity equations in the plane dynamic case, Cauchy problem, conservation laws, exact solutions.*

**Введение.** Уравнения линейной теории упругости были приведены в работах А. Коши, Л.Навье, Б. Сен-Венана и других еще в 19 веке. С тех пор делались попытки построить решения начальных и краевых задач. Для уравнений теории упругости в динамическом случае известны общие решения, построенные Г. Ламе, П.Ф. Папковичем, Х. Нейбером, М. Яковаке, Н.И. Остросаблиным и некоторыми другими [1]. Так методы группового анализа дифференциальных уравнений использованы в [2] и цитируемой там литературе. Теория симметрий позволила построить широкие классы инвариантных и частично-инвариантных решений, которые описывают напряженно-деформированное состояние упругой среды. Симметрии, в силу своей локальности, мало подходят для решения начальных и краевых задач. Здесь более приемлемы законы сохранения, которые уже начали использоваться для решения краевых задач (см. [3,4] и цитируемую там литературу). Фактически, без использования этого термина, законы сохранения применялись в решении линейных уравнениях Б. Риманом и В. Вольтерра. Известно [5], что уравнения теории упругости с помощью группового расщепления, можно представить в виде объединения двух равносильных систем дифференциальных уравнений первого порядка: разрешающей и автоморфной. Этот факт оказался очень полезным для построения законов сохранения и решения с их помощью задачи Коши.

В данной статье построены законы сохранения для разрешающей системы дифференциальных уравнений теории упругости, что дало возможность решить задачу Коши для этой системы в виде поверхностных интегралов по границе области. Далее была решена задача Коши для автоморфной системы – это позволило построить решение начальной задачи для уравнений теории упругости в динамическом случае.

**Предварительные сведения.** Рассмотрим уравнения упругости в плоском случае

$$w_{tt}^1 = (\lambda + 2\mu)w_{xx}^1 + \mu w_{yy}^1 + (\lambda + \mu)w_{xy}^2, \quad w_{tt}^2 = (\lambda + 2\mu)w_{yy}^2 + \mu w_{xx}^1 + (\lambda + \mu)w_{xy}^1, \quad (1)$$

где  $\lambda, \mu$  - постоянные Ламе,  $w^1, w^2$  - компоненты вектора перемещений, плотность равна единице.

На плоскости  $t = 0$  поставлена задача Коши

$$w^1|_{t=0} = f^1(x, y), \quad w^2|_{t=0} = f^2(x, y), \quad w_t^1|_{t=0} = g^1(x, y), \quad w_t^2|_{t=0} = g^2(x, y). \quad (2)$$

Если функции  $f^i, g^i$  - непрерывны вместе со своими производными на плоскости  $t = 0$ , то на этой плоскости нам известно значение всех производных функций  $w^1, w^2$  по любому направлению.

Известно, что система уравнений (1) гиперболического типа и имеет характеристические поверхности вида  $\omega(t, x, y) = 0$ , которые удовлетворяют уравнению

$$[(\lambda + 2\mu)(\omega_x^2 + \omega_y^2) - \omega_t^2][\mu(\omega_x^2 + \omega_y^2) - \omega_t^2] = 0. \quad (3)$$

Назначая дифференциальные инварианты функциями от инвариантов, получаем автоморфную систему

$$w_t^1 = u(t, x, y), \quad w_t^2 = v(t, x, y), \quad \theta(t, x, y) = w_x^1 + w_y^2, \quad \omega(t, x, y) = w_x^2 - w_y^1, \quad (4)$$

условия совместности уравнений (4) приводят к разрешающей системе

$$F_1 = u_t - (\lambda + 2\mu)\theta_x + \mu\omega_y = 0, \quad F_2 = v_t - (\lambda + 2\mu)\theta_y - \mu\omega_x = 0, \quad F_3 = \theta_t - u_x - v_y = 0, \quad (5)$$

$$F_4 = \omega_t - v_x + u_y = 0.$$

Система уравнений Ламе (1) равносильна системе (4), (5) [5]. Из начальных условий для уравнений (1) нетрудно получить начальные условия для функций входящих в уравнения (4) и (5). Имеем

$$\theta|_{t=0} = \partial_x f^1 + \partial_y f^2, \quad \omega|_{t=0} = \partial_x f^2 - \partial_y f^1, \quad u|_{t=0} = g^1, \quad v|_{t=0} = g^2. \quad (6)$$

**Постановка задачи.** Найти законы сохранения для разрешающей системы уравнений, позволяющие решить для нее задачу Коши (6). Далее пользуясь формулами (5) решить задачу Коши (2) для уравнений (1).

*Определение.* Законом сохранения для системы уравнений (5) назовем выражение вида

$$A_t + B_x + C_y = \sum_{i=1}^4 \rho^i F_i, \quad (7)$$

где  $\rho^i$  - некоторые линейные дифференциальные операторы, которые одновременно не равны тождественно нулю. Вектор  $(A, B, C)$  назовем сохраняющимся током, для закона сохранения (9).

Предположим, что сохраняющийся ток имеет вид

$$A = \alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1 \theta + \delta^1 \omega, \quad B = \alpha^2 u + \beta^2 v + \gamma^2 \theta + \delta^2 \omega, \quad C = \alpha^3 u + \beta^3 v + \gamma^3 \theta + \delta^3 \omega, \quad (8)$$

где  $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, \delta^i$  гладкие функции, зависящие только от  $t, x, y$ .

Подставим (8) в (7), получим многочлен первой степени по производным  $u_t, u_x, \dots, \omega_y$  и искомым функциям  $u, v, \theta, \omega$ . Приравнявая нулю, коэффициенты при этих переменных получаем

$$\alpha^1 = \rho^1, \quad \alpha^2 = -\rho^2, \quad \alpha^3 = -\rho^4, \quad \beta^1 = \rho^2, \quad \beta^2 = -\rho^4, \quad \beta^3 = -\rho^3, \quad (9)$$

$$\gamma^1 = \rho^3, \quad \gamma^2 = -(\lambda + 2\mu)\rho^1, \quad \gamma^3 = -(\lambda + 2\mu)\rho^2, \quad \delta^1 = \rho^4, \quad \delta^2 = -\mu\rho^2, \quad \delta^3 = -\mu\rho^1, \quad (10)$$

$$\alpha_t^1 - \gamma_x^1 + \delta_y^1 = 0, \beta_t^1 - \delta_x^1 - \gamma_y^1 = 0, \gamma_t^1 - (\lambda + 2\mu)\alpha_x^1 - (\lambda + 2\mu)\beta_y^1 = 0, \delta_t^1 - \mu\beta_x^1 + \mu\alpha_y^1 = 0.$$

Из (9) – (10) находим вид сохраняющегося тока (8).

Используя (8)-(10) после несложных, но громоздких вычислений получаем

$$\theta(x_0, y_0, t_0) = \frac{1}{2\pi(n+1)\sqrt{\lambda+2\mu}} \frac{\partial}{\partial t_0} \iint_{S_3} A dx dy, \quad \omega(x_0, y_0, t_0) = \frac{1}{2\pi(n+1)\sqrt{\mu}} \frac{\partial}{\partial t_0} \iint_{S_3} A dx dy. \quad (11)$$

Где  $A = \alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1 \theta + \delta^1 \omega$ ,

Теперь из формул (4) с учетом (11) и учетом начальных условий (2)

$$u_t = (\lambda + 2\mu)\theta_x - \mu\omega_y, \quad v_t = (\lambda + 2\mu)\theta_y + \mu\omega_x,$$

получаем

$$w^1 = \int_0^t u dt = \int_0^t \left( \int_0^t ((\lambda + 2\mu)\theta_x - \mu\omega_y) dt \right) dt + g^1(x, y)t + f^1(x, y),$$

$$w^2 = \int_0^t v dt = \int_0^t \left( \int_0^t ((\lambda + 2\mu)\theta_y + \mu\omega_x) dt \right) dt + g^2(x, y)t + f^2(x, y).$$

Эти формулы дают решение задачи Коши для системы уравнений (1).

*Замечание.* Методика решения задачи Коши, изложенная в этой работе, с некоторыми изменениями может быть использована для решений трехмерных динамических уравнений упругости. Это будет сделано в последующих работах.

#### Библиографические ссылки

1. Новацкий В. Теория упругости. Москва, Мир, 1975.
2. Аннин Б.Д., Бытев В.О., Сенашов С.И. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности. Новосибирск, Наука, 1983.
3. Сенашов С.И., Савостьянова И.Л. Об упругом кручении вокруг трех осей // Сибирский журнал индустриальной математики. 2021, т.24, №1, с.120-125.
4. Гомонова О.В., Сенашов С.И., Черепанова О.Н. Групповой анализ уравнений идеальной пластичности // Журнал ПМТФ, 2021, т. 62, №5, с. 208-216.
5. Прудников В.Ю., Чиркунов Ю.А. Групповое расслоение уравнений Ламе. // ПММ, т.52, в.3, с. 471-477.

#### References

1. Novatsky V. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Mir, 1975.
2. Annin B.D., Bytev V.O., Senashov S.I. *Gruppovye svoystva uravnenij uprugosti i plastichnosti* [Group properties of elasticity and plasticity equations] Novosibirsk, Nauka, 1983.
3. Senashov S.I., Savostyanova I.L. On elastic torsion around three axes // *Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki*. 2021, vol.24, No. 1, pp.120-125.
4. Gomonova O.V., Senashov S.I., Cherepanova O.N. Group analysis of equations of ideal plasticity // *Zhurnal PMTF*, 2021, vol. 62, No. 5, pp. 208-216.
5. Prudnikov V.Yu., Chirkunov Yu.A. Group bundle of equations Lama. // *PMM*, vol.52, v.3, pp. 471-477.

© Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., 2023

УДК 517.956+534.2

## ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ АКУСТИКИ

Ю. В. Шанько

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44  
E-mail: shy70@mail.ru

*Рассмотрен класс точных обобщенных функционально-инвариантных решений двумерного неоднородного волнового уравнения, для которого определяющая функция имеет произвол в три константы.*

*Ключевые слова: уравнение неоднородной акустики, точные решения.*

## ON EXACT GENERALIZED FUNCTIONALLY INVARIANT SOLUTIONS OF THE 2D INHOMOGENEOUS ACOUSTICS EQUATION

Yu. V. Shan'ko

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: shy70@mail.ru

*The paper considers a class of exact generalized functionally invariant solutions of a 2D inhomogeneous wave equation for which the determining function depends on three arbitrary constants.*

*Keywords: inhomogeneous acoustics equation, exact solutions.*

В работе [1] исследовались обобщенно функционально-инвариантные (ОФИ) решения для двумерного неоднородного волнового уравнения

$$p_{tt} = \rho c^2 \left( (p_x / \rho)_x + (p_y / \rho)_y \right). \quad (1)$$

Здесь давление  $p$  зависит от времени  $t$  и декартовых координат  $x$  и  $y$ . Плотность  $\rho(x, y)$  и скорость звука  $c(x, y)$  считаются заданными. Уравнение (1) описывает распространение звука в двумерной неподвижной неоднородной среде [2].

В [1] доказана теорема, которая дает необходимые условия существования ОФИ решения для уравнения (1). Вид ОФИ решения определяется функцией  $\Phi$ , которая удовлетворяет некоторой переопределенной системе дифференциальных уравнений. Случай 7 теоремы соответствует решению этой переопределенной системы с произволом в три константы. Это имеет место, когда  $c^2 \Delta(\ln c) = \text{const}$ , а  $\Delta(4\rho^{-1/2}) = \rho^{-1/2} \Delta(\ln c)$ , где  $\Delta$  – двумерный оператор Лапласа. В данной работе строятся соответствующие точные ОФИ решения.

### Библиографические ссылки

1. Шанько Ю. В. Обобщенные функционально-инвариантные решения двумерного неоднородного волнового уравнения. // Сиб. журн. индустр. матем. 2013. Т. 16, № 1. С. 126–137.
2. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.

### References

1. Shan'ko Yu. V. *Obobshchennye funktsional'no-invariantnye resheniya dvumernogo neodnorodnogo volnovogo uravneniya*. [Generalized functionally invariant solutions of the two-dimensional inhomogeneous wave equation] // Sib. Journ. Industr. Math. Vol. 16, No 1, pp. 126–137. (In Russ.)
2. Brekhovskikh L. M., Godin O. A. *Akustika sloistyx sred* [Acoustics of layered media]. M.: Nauka, 1989. (In Russ.)



**Секция**  
**«ХИМИЯ**  
**И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

УДК 661.728.86

## ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВОГРУНТА ЭФИРАМИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ТЕРРИТОРИЙ ФГУП «ПО КХК ЕНИСЕЙ»

Д. В. Антишин\*, А. В. Кошкин, Д. С. Лебедева, Е. А. Стручинская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: andevl@yandex.ru

*В статье рассматривается проблема загрязнения почвогрунта нитроцеллюлозой территорий ФГУП «Красноярский химический комбинат Енисей», а так же предлагается схема решения сложившейся проблемы по этапам.*

*Ключевые слова: антропогенное воздействие, нитроцеллюлоза, шламонакопитель, почвогрунт, ФГУП «Красноярский химический комбинат Енисей».*

## ASSESSMENT OF SOIL CONTAMINATION WITH CELLULOSE ESTERS IN THE TERRITORIES OF FSUE "PO KHK YENISEI"

D. V. Antishin\*, A. V. Koshkin, D. S. Lebedeva, E. A. Struchinskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: pekhotinkv@sibsau.ru

*The article deals with the problem of soil contamination with nitrocellulose of the territories of the Federal State Unitary Enterprise "Krasnoyarsk Chemical Combine Yenisei", and also suggests a scheme for solving the current problem in stages.*

*Keywords: anthropogenic impact, nitrocellulose, sludge accumulator, soil, FSUE "Krasnoyarsk Chemical Combine Yenisei".*

Ранее нами сообщалось о сложившейся ситуации на территории ФГУП «ПО КХК Енисей» [1]. Ситуация уникальна в том плане что крайне затруднительно разделить почвогрунт от экотоксикантов, а следовательно обеззараживать, утилизировать их необходимо совместно.

Суммарная площадь территории на которой может быть обнаружена нитроцеллюлоза составляет около 18,5 гектар, а зона высокой вероятности нахождения нитроцеллюлозы 1,25 гектара. По действующим нормативным документам твердые отходы производства отбираются на свалках, полигонах из расчета одна объединенная проба на 0,01 Га [2], в то время как для определения содержания в почве химических веществ одна объединенная проба на 1 Га [3]. Количество точных (единичных проб) так же варьируется, так при использовании метода «конверт» количество точечных проб составляет 5 точек, и при неоднородности агрохимических показателей почв может быть увеличено до 40 [4]. Поэтому складывается ситуация в которой возможны различные подходы к пробоотбору, однако нитроцеллюлоза не растворяясь в воде, не мигрирует, в отличие от большинства химических веществ обуславливающих агрохимические показатели почв, что усложняет задачу определения и требует значительного увеличения отбора точечных проб для формирования более полной картины загрязнения территории и объемов нитроцеллюлозы загрязняющей почвогрунт.

Предлагаемая схема решения проблемы по этапам:

1. Оценка территории и объемов загрязнения почвогрунта.
2. Отбор проб и проведение анализов с целью идентификации характера и параметров экотоксикантов.
3. Разработка методологии и регламентирующей документации для очистки почвогрунта.

4. Проведение очистки территории с подготовкой ответственного хранения почвогрунта перед утилизацией.

5. Подготовка технологической линии утилизации экотоксикантов.

6. Проведение очистки подготовленного почвогрунта.

Первичная задача перейти к целостному проекту оценки, разработки и реализации проекта обезвреживания шламонакопителя и почвогрунта прилегающие территории. Подход реализуемый на данный момент, при котором проектная организация разрабатывает варианты технологий, а реализовать их будет сторонняя организация, может привести не только к перерасходу средств, но и не выполнению очистки в ближайшие годы. Опасения обусловлены тем, что может вскрыться наличие экотоксикантов в значительно больших объемах чем будет установлено при стандартном подходе, например отбор одной точки на гектар, с объединением пяти точечных проб [3].

### Библиографические ссылки

1. Антишин Д. В., Деактивация экотоксикантов производств оборонной промышленности в почвогрунте / Д. В. Антишин, Д. С. Лебедева, Е. А. Стручинская, А. В. Кошкин // Вода: химия и экология. – 2023. – №. 8. – С. 61-65.

2. ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3:3.2-03 Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления. М. 2014. 15 с.

3. ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб : национальный стандарт Российской Федерации / – Москва : Стандартиформ, 2018. – 7 с.

4. ГОСТ 58595-2019 Почвы. Отбор проб : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2020.01.01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 8 с.

### References

1. Antishin D. V., Deactivation of ecotoxicants of defense industry productions in soil / D. V. Antishin, D. S. Lebedeva, E. A. Struchinskaya, A.V. Koshkin //Water: chemistry and ecology. – 2023. – No. 8. –61-65 p.p.

2.HDPE F 12.1:2:2.2:2.3:3.2-03 Methodological recommendations. Sampling of soils, soils, bottom sediments, silts, sewage sludge, industrial wastewater sludge, production and consumption waste. M. 2014. 15 p.

3. GOST 17.4.3.01-2017 Nature protection. Soils. General requirements for sampling : National standard of the Russian Federation : date of introduction 2019.01.01 / – Moscow : Standartinform, 2018. – 7 p.

4. GOST 58595-2019 Soil. Sampling : national standard of the Russian Federation : date of introduction 2020.01.01 / Federal Agency for Technical Regulation. – Official edition. – Moscow : Standartinform, 2019. – 8 p.

© Антишин Д. В., Кошкин А. В., Лебедева Д. С., Стручинская Е. А., 2023

УДК 546.922, 542.06

## СИНТЕЗ НОВЫХ ПИНЦЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПЛАТИНЫ РОСО<sup>P<sub>h</sub></sup>-ТИПА, СОДЕРЖАЩИХ НЕПРЕДЕЛЬНЫЕ СПИРТЫ\*

Д. С. Волкова\*, О. С. Чудин, В. В. Верпекин

Институт химии и химической технологии СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/24  
\*E-mail: 2198vds@gmail.com

*Синтезирована серия новых пинцерных комплексов платины, содержащих в качестве  $\sigma$ -алкинильных лигандов непредельные третичные спирты  $[C_6H_3-1,3-(OPPh_2)_2]Pt-C\equiv C-CR_2OH$  (**a** ( $R^1=R^2=CH_3$ ), **b** ( $R^1=CH_3$ ,  $R^2=Ph$ ), **c** ( $R^1=R^2=Ph$ )).*

*Ключевые слова: платина, пинцерный комплекс, алкинильные лиганды, непредельные спирты, третичные спирты.*

## SYNTHESIS OF NEW РОСО<sup>P<sub>h</sub></sup>-TYPE PLATINUM PINCER COMPLEXES CONTAINING UNSATURATED ALCOHOLS

D. S. Volkova\*, O. S. Chudin, V. V. Verpekin

Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS  
50/24 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: 2198vds@gmail.com

*A series of new platinum pincer complexes containing unsaturated tertiary alcohols as  $\sigma$ -alkynyl ligands  $[C_6H_3-1,3-(OPPh_2)_2]Pt-C\equiv C-CR_2-OH$  (**a** ( $R_{1,2}=CH_3$ ), **b** ( $R_1=CH_3$ ,  $R_2=Ph$ ), **c** ( $R_{1,2}=Ph$ )) has been synthesized.*

*Keywords: platinum, pincer complex, alkynyl ligands, unsaturated alcohols, tertiary alcohols.*

В настоящее время исследования в области металлоорганической химии переходных металлов привлекают все большее внимание исследователей в связи с широким спектром применения таких соединений в различных сферах науки и технологии [1]. В частности, пинцерные комплексы платины используются при создании новых материалов, обладающих специфической каталитической, окислительно-восстановительной, оптической или сенсорной активностью [2, 3]. Высокая стабильность таких комплексов позволяет использовать их в биохимии и медицине в качестве маркеров в физиологических условиях [4, 5].

Электронная и пространственная конфигурация пинцерных комплексов позволяет настраивать металлосреду, что способствует легкой модификации их структуры. Пинцерные комплексы платины РОСО<sup>P<sub>h</sub></sup>-типа ( $C_6H_4-[OPPh_2]_2$ ) с различными терминальными  $\sigma$ -алкинильными лигандами мало изучены, поэтому целью работы являлся синтез новых комплексов платины РОСО<sup>P<sub>h</sub></sup>-типа, содержащих гидроксо этинильные заместители. В тоже время, такие заместители наблюдаются в соединениях, обладающих противораковой активностью и использующиеся в качестве строительных блоков для получения функциональных материалов [6].

Нами были изучены реакции замены атома хлора в пинцерном комплексе (РОСО<sup>P<sub>h</sub></sup>)PtCl **I** на непредельные третичные спирты **II a-c**: 2-метил-3-бутин-2-ол (**II a**), 2-фенил-3-бутин-2-ол (**II b**) и 1,1-дифенил-2-пропин-1-ол (**II c**) (рис. 1). Синтез проводили при комнатной температуре с применением

\* Исследование проводилось с использованием оборудования Красноярского регионального научно-исследовательского центра Сибирского отделения Российской академии наук в рамках бюджетного проекта 121031500209-6 для Института химии и химической технологии СО РАН.

хлористого метилена в качестве растворителя и с эквимолярным количеством реагентов I и II, 2-кратным избытком триэтиламина и в присутствии 30 мол.% хлорида меди.

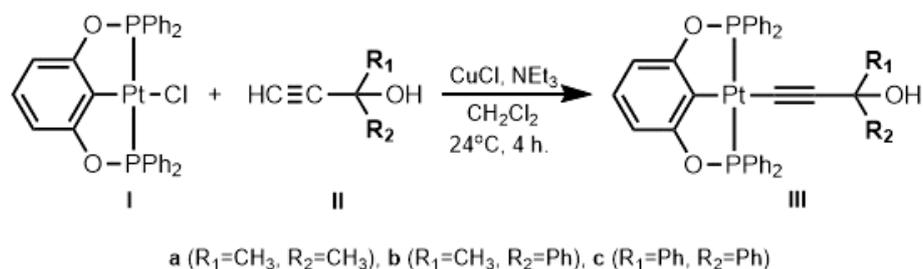


Рис. 1. Взаимодействие (РОСОР<sup>Ph</sup>)PtCl с третичными спиртами

Таким образом, получены с количественным выходом новые пинчерные комплексы платины РОСОР-типа, содержащие в своей структуре неперделённые третичные спирты. Строение синтезированных соединений подтверждено методами ИК- и ЯМР-спектроскопии.

### References

1. Albrecht M, van Koten G. Platinum Group Organometallics Based on "Pincer" Complexes: Sensors, Switches, and Catalysts In memory of Prof. Dr. Luigi M. Venanzi and his pioneering work in organometallic chemistry, particularly in PCP pincer chemistry. *Angew Chem Int Ed Engl.*, 2001, vol. 40(20), p. 3750-3781.
2. Leininger S, Olenyuk B, Stang P. J. Self-assembly of discrete cyclic nanostructures mediated by transition metals. *Chem Rev.*, 2000, vol. 100(3), p. 853-908.
3. Stang P. J., Olenyuk B. Self-Assembly, Symmetry, and Molecular Architecture: □ Coordination as the Motif in the Rational Design of Supramolecular Metallacyclic Polygons and Polyhedra. *Acc. Chem. Res.*, 1997, vol. 30(12), p. 502–518.
4. Albrecht M, Rodríguez G, Schoenmaker J, van Koten G. New peptide labels containing covalently bonded platinum(II) centers as diagnostic biomarkers and biosensors. *Org Lett.*, 2000, vol. 2(22), p. 3461-4.
5. Mazzeo M., Strianese M., Kühl O., Peters J. C. Phosphido pincer complexes of platinum: synthesis, structure and reactivity. *Dalton Trans.*, 2011, vol. 40, p. 9026-9033.
6. Kashyap J. T., Bardwi N., Surovi S., Manobjyoti B. Efficient Ru-Catalyzed Electrochemical Homo- and Heterocoupling Reaction of Terminal Alkynes: Synthesis, In Vitro Anticancer Activity, and Docking Study. *ACS Omega*, 2023, vol. 8(36), p. 32635–32642.

© Волкова Д. С., Чудин О. С., Верпекин В. В., 2023

УДК 547.773

**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СТРОЕНИЯ (ЭТАН-1,2-ДИИЛБИС(ОКСИ))БИС(ЭТАН-2,1-ДИИЛ)  
БИС(2-(3,5-ДИМЕТИЛ-4-НИТРОЗО -1Н-ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)АЦЕТАТА)**

Э. И. Голенко, А. В. Боброва, Е. В. Роот

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: golenkoelina@gmail.com

*Осуществлено доказательство строения нового (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо -1Н-пиразол-1-ил)ацетата) методами ИК, ЯМР <sup>1</sup>H, ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии.*

*Ключевые слова: Алкилирование, 4-нитрозопиразол, (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-хлорацетат), динитрозосоединения, ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопия, ИК-спектроскопия.*

**PROOF OF THE STRUCTURE OF (ETHANE-1,2-DIYLBIS(OXY))BIS(ETHANE-2,1-DIYL)  
BIS(2-(3,5-DIMETHYL-4-NITROSO-1H-PYRAZOL-1-YL)ACETATE)**

E. I. Golenko, A. V. Bobrova, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: golenkoelina@gmail.com

*The proof of the structure of the new (ethane-1,2-diyl bis(oxy))bis(ethane-2,1-diyl) bis(2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole-1-yl)acetate) by <sup>1</sup>H NMR, <sup>13</sup>C NMR spectroscopy and IR spectroscopy methods.*

*Keywords: Alkylation, 4-nitrosopyrazole, (ethane-1,2-diylbis(oxy))bis(ethane-2,1-diyl) bis(2-chloroacetate), dinitroso compounds, , <sup>1</sup>H NMR spectroscopy, IR spectroscopy.*

Известно, что производные 4-нитрозопиразола способны проявлять различную биологическую активность и высокую реакционную способность [1], что обуславливает интерес к ним в фармацевтической химии [2,3]. Биспроизводные 4-нитрозопиразола интересны для использования в качестве модификаторов каучуков [4].

Целью данной работы стало доказательство строения ранее полученного нами (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)ацетата) [5] методами ИК, ЯМР <sup>1</sup>H, ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии.

Спектры ЯМР <sup>1</sup>H (600.13 МГц), ЯМР <sup>13</sup>C (150.90 МГц) регистрировали на спектрометре Bruker Avance III 600. Отнесение сигналов <sup>1</sup>H и <sup>13</sup>C выполнено с использованием двумерной гетероядерной (<sup>1</sup>H-<sup>13</sup>C HSQC, <sup>1</sup>H-<sup>13</sup>C HMBC) корреляционной ЯМР-спектроскопии. Химические сдвиги <sup>1</sup>H и <sup>13</sup>C указаны относительно остаточного сигнала растворителя (CDCl<sub>3</sub>: δ = 7.26 (1H) и 77.16 м.д. (13C); DMSO-d<sub>6</sub>: δ = 2.50 (1H) и 39.5 м.д. (13C)). ИК спектр регистрировали с помощью ИК-микроскопа SpecTRA TECH InspecIR на базе ИК-Фурье спектрофотометра Impact 400.

Рассматриваемое соединение было синтезировано по реакции 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола [6] с (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-хлорацетатом) [7] при кипячении в ацетоне в течение 3,5 ч (рис. 1). Выход составил 26%.

Спектральные данные приведены в таблице.

ЯМР<sup>1</sup>H и ЯМР<sup>13</sup>C спектры соединения изображены на рисунке 2.

В спектре ЯМР <sup>1</sup>H (CDCl<sub>3</sub>) (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)ацетата) в области сильного поля 2.304-2.877 м.д. в виде уширенных синглетов регистрируются протоны метильных групп пиразольных колец. Сигналы протонов метилено-

вых групп, связанных с атомами кислорода, регистрируются в области 3.600 м.д. в виде синглета, 3.703-3.719 м.д. и 4.372-4.388 м.д. – в виде триплетов. В области 4.904 м.д. регистрируется сигналы протонов двух метиленовых групп, связанных с атомами азота пиразольного кольца.

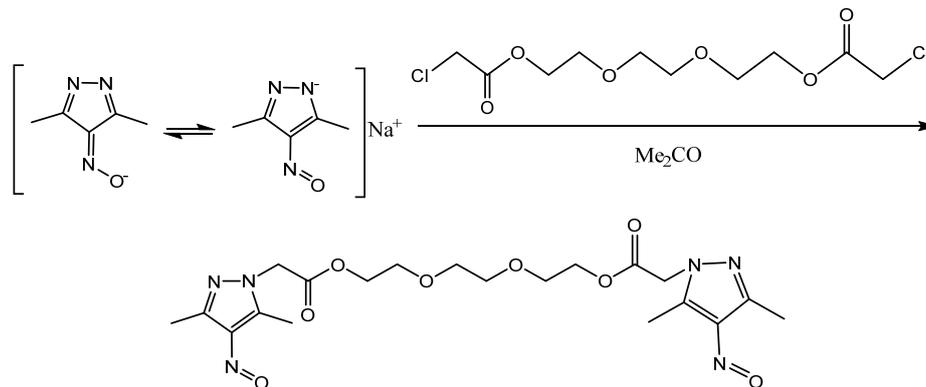


Рис. 1 Синтез (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)ацетата)

#### Спектральные данные полученного соединения

ИК-спектр, $\nu$ , $\text{cm}^{-1}$	ЯМР $^1\text{H}$ , $\delta$ , м.д.	ЯМР $^{13}\text{C}$ , $\delta$ , м.д.
1549, 1353 (N=O), 1730 (C=O)	2.30 уш. с (6H, 2CH <sub>3</sub> ), 2.88 уш. с (6H, 2CH <sub>3</sub> ), 3.60 с (4H, 2CH <sub>2</sub> ), 3.70 – 3.72 м (4H, 2CH <sub>2</sub> ), 4.37 – 4.39 м (4H, 2CH <sub>2</sub> ), 4.90 с (4H, 2CH <sub>2</sub> ).	9.91 (2CH <sub>3</sub> ), 13.14 (2CH <sub>3</sub> ), 50.50 (2CH <sub>2</sub> ), 65.33 (2CH <sub>2</sub> ), 68.91 (2CH <sub>2</sub> ), 70.70 (2CH <sub>2</sub> ), 160.33 (2C-N=O), 166.54 (2C=O)

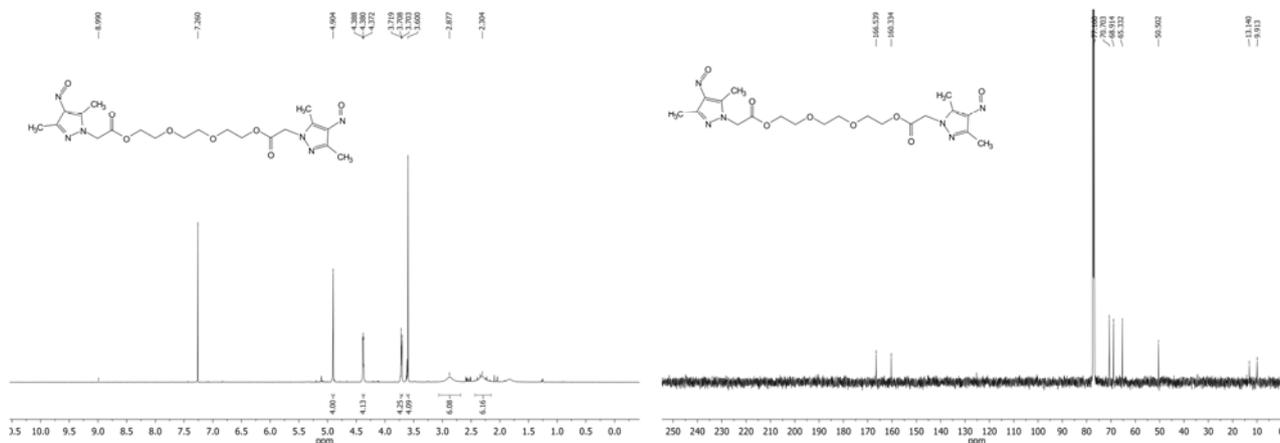


Рис. 2 ЯМР  $^1\text{H}$  и ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектры (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)ацетата)

В спектре ЯМР  $^{13}\text{C}$  ( $\text{CDCl}_3$ ) в области сильного поля 9.913-13.140 м.д. наблюдаются сигналы метильных групп пиразольных колец. В областях 50.502 м.д., 65.332 м.д., 68.914 м.д. и 70.703 м.д. регистрируются сигналы атомов углерода метиленовых групп сложноэфирного фрагмента. Сигнал атомов углерода, связанных с нитрозогруппами, регистрируется в области слабого поля 160.334 м.д. Сигнал атомов углерода карбонильных групп регистрируется в области слабого поля 166.539 м.д.

#### Библиографические ссылки

1. Orth R. E. Biologically active pyrazoles // J. Pharm Sci., 1968. 57, 537.
2. Данилов Е.А., Исляйкин М.К. Введение в химию и технологию химико-фармацевтических препаратов, под ред. Г.П. Шапошникова ; Иваново, 2002. 284 с.

3. Rizk, H.F. Synthesis of some novel heterocyclic dyes derived from pyrazole derivatives / H.F. Rizk, M.A. El-Badawi, S.A. Ibrahim, M.A. El-Borai. // Arab. J. Chem, 2011. Vol. 4. P. 37-44.
4. Ключников, О. Р. Холодная вулканизация непредельных каучуков Снитрозными системами / О. Р. Ключников, Р. Я. Дебердеев, Г.Е. Заиков // Каучук и резина. -2005. -№ 5. -С. 2-5.
5. Голенко Э. И., Боброва А. В., Роот Е. В. Синтез (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо -1Н-пиразол-1-ил)ацетата) // Химическая наука и образование Красноярья : материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции в рамках XXIV Международного научно-практического форума студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука XXI века», 18–20 мая 2023 г., Красноярск, 2023. Т. 1. С. 17-21.
6. Cameron M., Gowenlock B. G., F. Boyd A. S. Studies in nitrosopyrazoles. Part 1. Preparative and spectroscopic studies of some 3,5-dialkyl-4-nitrosopyrazoles. J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2 1996. Vol. 11, 2271-2274.
7. Sheibani N., Zohari N., Fareghi-Alamdari R. Rational design, synthesis and evaluation of new azido-ester structures as green energetic plasticizers. Dalton Transactions 2020. Vol. 49, 12695-12706.

### References

1. Orth R. E. Biologically active pyrazoles // J. Pharm Sci., 1968. 57, 537.
2. Danilov E.A., Islaykin M.K. Introduction to chemistry and technology of chemical-pharmaceutical preparations, edited by G.P. Shaposhnikov ; Ivanovo, 2002. 284 p.
3. Rizk, H.F. Synthesis of some novel heterocyclic dies derived from pyrazole derivatives / H.F. Rizk, M.A. El-Badawi, S.A. Ibrahim, M.A. El-Borai. // Arab. J. Chem, 2011. Vol. 4. P. 37-44.
4. Klyuchnikov, O. R. Kholodnaya Vulcanization of unsaturated rubbers with Nitrous systems / O. R. Klyuchnikov, R. Ya. Deberdeev, G.E. Zaikov // Rubber and rubber. -2005. -No. 5. – P. 2-5.
5. Golenko E. I., Bobrova A.V., Root E. V. Synthesis (ethane-1,2-diylbis)bis(ethane-2,1-diyl) bis(2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazol-1-yl)acetate) // Chemical science and education of Krasnoyarsk : materials of the XVI All-Russian Scientific and practical conference within the XXIV International Scientific and Practical Forum of students, postgraduates and Young Scientists "Youth and Science of the XXI century", May 18-20, 2023, Krasnoyarsk, 2023. Vol. 1. P. 17-21.
6. Cameron M., Gowenlock B. G., F. Boyd A. S. Studies in nitrosopyrazoles. Part 1. Preparative and spectroscopic studies of some 3,5-dialkyl-4-nitrosopyrazoles. J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2 1996. Vol. 11, 2271-2274.
7. Sheibani N., Zohari N., Fareghi-Alamdari R. Rational design, synthesis and evaluation of new azido-ester structures as green energetic plasticizers. Dalton Transactions 2020. Vol. 49, 12695-12706.

© Голенко Э. И., Боброва А. В., Роот Е. В., 2023

УДК 541.127:662.1

**ВЛИЯНИЕ ДИОКСИДА СВИНЦА НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ  
1,3,5,7-ТЕТРАНИТРО-1,3,5,7-ТЕТРААЗАЦИКЛООКТАНА  
В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

А. В. Держаева\*, А. С. Недорубов, Л. А. Круглякова, К. В. Пехотин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: aleksaderzhaeva@mail.ru

*Добавка диоксида свинца снижает температуры начала и интенсивного разложения 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ), энергетического компонента твердых ракетных топлив.*

*Ключевые слова: термическое разложение, катализ, 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктан, диоксид свинца.*

**EFFECT OF LEAD DIOXIDE ON THE THERMAL DECOMPOSITION  
OF 1,3,5,7-TETRANITRO-1,3,5,7-TETRAAZACYCLOOCTANE UNDER  
NON-ISOTHERMAL CONDITIONS**

A. V. Derzhaeva\*, A. S. Nedorubov, L. A. Kruglyakova, K. V. Pekhotin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: aleksaderzhaeva@mail.ru

*The addition of lead dioxide reduces the onset and intensive decomposition temperatures of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane (HMX), the energetic component of solid rocket propellants.*

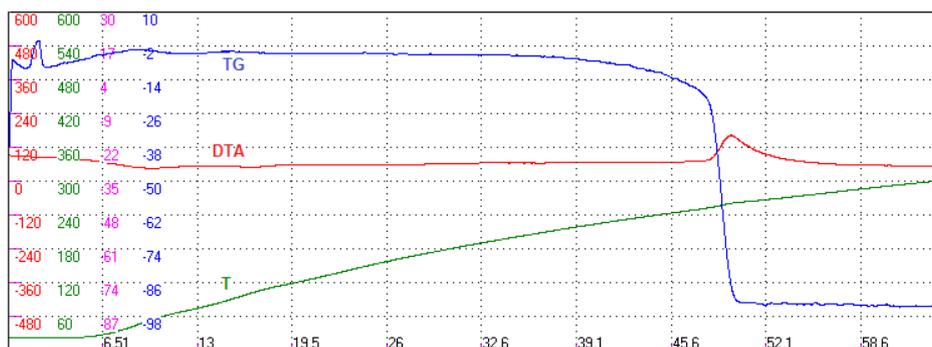
*Keywords: thermal decomposition, catalysis, 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane, lead dioxide.*

**Введение.** Исследование влияния различных добавок на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ) представляет как научный, так и практический интерес. С одной стороны, это позволяет глубже понять механизм каталитического разложения и горения нитраминов, а с другой – подбирать модификаторы для регулирования скорости горения твердых ракетных топлив, содержащих нитрамины. В продолжение работ [1-3] нами изучено термическое разложение НМХ с добавками диоксида свинца в неизотермических условиях при разных скоростях нагрева образцов.

**Результаты и их обсуждение.** Термическое разложение НМХ с добавкой диоксида свинца проводили в условиях динамического нагрева на дериватографе Q-1500D при скоростях нагревания 1,25; 2,5; 5 и 10 град·мин<sup>-1</sup> от комнатной температуры до 500°C. Масса навески составляла 20 мг. Способ нанесения добавки описан в [1].

Характер термического разложения образца с добавкой PbO<sub>2</sub> аналогичен поведению чистого НМХ: процесс протекает без плавления; по достижении температуры начала разложения начинается быстрая убыль массы образца с выраженным экзотермическим эффектом. Термограмма процесса при скорости нагрева 5 град·мин<sup>-1</sup> представлена на рис. 1.

Найденные температуры начала, T<sub>нр</sub>, и интенсивного разложения, T<sub>max</sub>, (соответствующие максимуму на кривой теплового эффекта), а также рассчитанные методами Озава [4] и Киссинджера [5] по зависимости T<sub>max</sub> от скорости нагрева активационные параметры приведены в таблице. Здесь же представлены данные для НМХ без добавок.

Рис. 1. Термограмма образца НМХ с добавкой  $\text{PbO}_2$  при скорости нагрева  $5 \text{ град}\cdot\text{мин}^{-1}$ 

На рис. 2 приведен совмещенный график тепловыделения изученных образцов при разных скоростях нагрева.

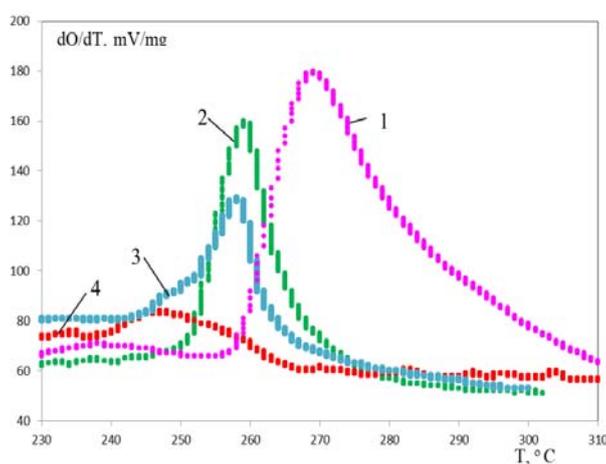


Рис. 2. Дифференциальные кривые тепловыделения при скорости нагрева,  $\text{град}\cdot\text{мин}^{-1}$ :  
1 – 10; 2 – 5; 3 – 2,5; 4 – 1,25

Таблица

**Характеристические температуры и активационные параметры термораспада НМХ с добавкой в неизотермических условиях**

Добавка	Скорость нагрева, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$	$T_{\text{нр}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	$E$ [ $\text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ]		$\lg A$ (метод Киссинджера)
				метод Озава	метод Киссинджера	
без добавки	2,5	254	262,5	213,9	211,9	20,29
	5,0	256	266,5			
	10,0	262	276			
$\text{PbO}_2$	1,25	237	247	218,3	220,7	14,16
	2,5	248	258,3			
	5	251	259,2			
	10	258	268,3			

Из данных таблицы видно, что добавка  $\text{PbO}_2$  снижает температуры начала и интенсивного разложения НМХ на 4-6 градусов (в зависимости от скорости нагревания). В работах [1, 3] было показано, что металлы переменной валентности способствуют интенсификации окислительно-восстановительных процессов при термоллизе НМХ. Полученные нами результаты свидетельствуют о более высокой активности диоксида свинца по сравнению с изученными ранее оксидами марганца, кобальта и ванадия [3].

Полученные кинетические параметры могут использоваться при оценке стойкости НМХ с добавкой  $PbO_2$  в условиях переработки и эксплуатации.

### Библиографические ссылки

1. Круглякова Л.А., Пехотин К.В., Голубцова О.А., Тагильцева В.Ю. Термолиз октогена в присутствии оксидов металлов // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву, Суздаль, 4–9 сентября 2022 г., С. 77-78.
2. Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Дударева Е. Д. Влияние формиата аммония на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана // Решетневские чтения. Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (10–12 ноября 2021, г. Красноярск). Электронный ресурс. Ч. 1. С. 649-651.
3. Попов М. А., Дударева Е. Д., Круглякова Л. А., Пехотин К. В. Влияние диоксида марганца на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана // Материалы VI Международной научно-практической конференции творческой молодежи "Актуальные проблемы авиации и космонавтики" (12-16 апреля 2021 года, г. Красноярск). Т.1. С.457-459.
4. Ozawa, T. A. New Method of Analyzing Thermogravimetric Data // Bull. Chemical Society of Japan. 1965. P. 1881-1886.
5. Kissenger H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis // Analytical Chemistry. 1957. Vol. 29. N. 11. P. 1702-1706.

### References

1. Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V., Golubtsova O. A., Tagiltseva V. Yu. Thermolysis of octogen in the presence of metal oxides // Abstracts of the XVI All-Russian Symposium on Combustion and Explosion, Suzdal, September 4–9, 2022, P. 77-78.
2. Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V., Dudareva E. D. Effect of ammonium formate on thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane // *Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2021, p. 649–651. (In Russ.).
3. Popov M. A., Dudareva E. D., Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V. Effect of manganese dioxide on thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane // Materials of the VI International Scientific and Practical Conference of Creative Youth "Actual Problems of Aviation and Cosmonautics" (April 12-16, 2021, Krasnoyarsk). T.1. S.457-459.
4. Ozawa, T. A. New Method of Analyzing Thermogravimetric Data // Bull. Chemical Society of Japan. 1965. P. 1881-1886.
5. Kissenger H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis // Analytical Chemistry. 1957. Vol. 29. N. 11. P. 1702-1706.

© Держаева А. В., Недорубов А. С., Круглякова Л. А., Пехотин К. В., 2023

УДК 547.655.3

## СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ БИС(1-НИТРОЗОНАФТАЛЕН-2-ОЛАТ) 1,6-ГЕКСАНДИАММОНИЯ

Н. П. Дюрба\*, Е. Р. Вдовина, В. В. Ившина, Н. А. Гаврилова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: ndyurba@gmail.com

*Аминированием 1-нитрозо-2-нафтола гексаметилендиамином синтезирована ранее неизвестная гексаметиленаммониевая соль нитрозонафтола, строение которой подтверждено данными электронной и ЯМР-спектроскопии.*

*Ключевые слова: аминирование, диамины, нитрозонафтол, аммонийные соли.*

## SYNTHESIS AND STRUCTURE OF 1,6-HEXANDIAMMONIUM BIS(1-NITROSONAPHTHALEN-2-OLATE)

N. P. Dyurba\*, E. R. Vdovina, V. V. Ivshina, N. A. Gavriloa

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ndyurba@gmail.com

*We studied amination of 1-nitroso-2-naphthol with hexamethylenediamine and synthesized previously unknown hexaammonium salt of nitrosonaphthol, the structure of which was confirmed by electron and NMR spectroscopy.*

*Keywords: amination, diamines, nitrosonaphthol, ammonium salts.*

1-Нитрозо-2-нафтиламины находят применение в органическом синтезе в качестве исходных соединений, к примеру, в синтезе нафтоимидазолов, некоторые представители которых обладают противовоспалительной [1], а также антигипертензивной активностью [2].

Основным методом получения 1-нитрозо-2-нафтиламинов является реакция аминирования 1-нитрозо-2-нафтола первичными алифатическим аминами в водных или водно-спиртовых растворах [1,3] или в пиридине [4].

Аминирование нитрозонафтола диаминами до сих пор не изучалось, поэтому целью нашей работы стало исследование взаимодействия 1-нитрозо-2-нафтола с гексаметилендиамином.

Мы провели реакцию гексаметилендиамина с двукратным избытком 1-нитрозо-2-нафтола (1) в пиридине при комнатной температуре (рис.1). В течение первых 20-30 минут наблюдали образование зеленого осадка. Осадок хорошо растворим в воде, а ТСХ эфирной вытяжки из подкисленного водного раствора показало хроматографическую зону, соответствующую исходному нитрозонафтолу. Поэтому мы предположили, что данное соединение представляет собой гександиаммониевую соль 1-нитрозо-2-нафтола (2).

Для нитрозонафтолов и их солей возможно образование двух таутомерных форм. В работе [5] на основании данных ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  спектроскопии было установлено, что в солях щелочных металлов 1-нитрозо-2-нафтола анион находится преимущественно в оксимной форме, нитрозоформа присутствует в малом количестве.

В спектре ЯМР  $^{13}\text{C}$  гександиаммониевой соли 1-нитрозо-2-нафтола (2) наблюдаются сигналы углеродов нафталинового кольца в области 116,52-183,38 м.д. Сигнал при 183,83 м.д. характерен для атомов углерода группы  $\text{C}=\text{O}$ , а сигнал при 152,53 м.д. – для атомов углерода группы  $\text{C}=\text{N}$ . Таким образом, можно предположить, что соль (2) в ДМСО- $d_6$  также преимущественно существует в хиноноксимной форме (2А), как и соли щелочных металлов.

В спектре ЯМР  $^1\text{H}$  (ДМСО- $d_6$ ) химические сдвиги протонов нафталинового фрагмента (6,57-9,37 м.д.), характер расщепления сигналов и КССВ соответствуют данным  $^1\text{H}$  ЯМР для щелочных солей 1-нитрозо-2-нафтола [5]. Сигналы протонов метиленовых групп катиона 1,6-гександиаммония находятся в сильном поле в области 1,27-2,74 м.д.

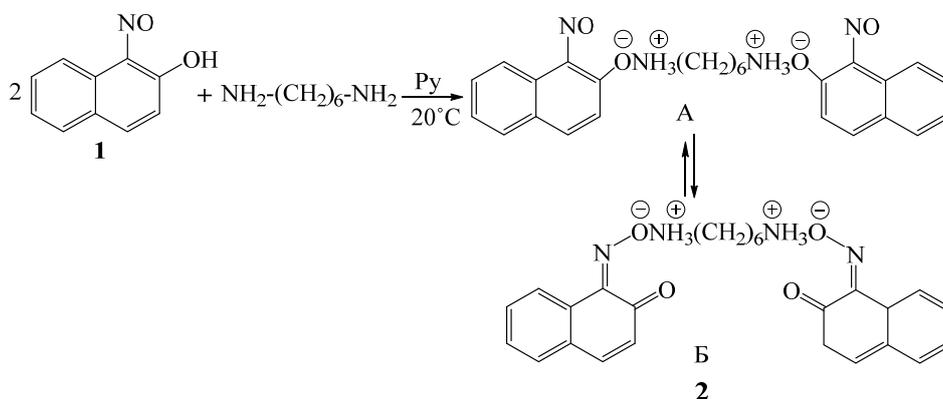


Рис. 1 – Взаимодействие 1-нитрозо-2-нафтола с гексаметилендиамином при  $t=20^\circ\text{C}$

Отнесение сигналов вторичных и третичных атомов углерода сделали на основании двумерного  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HSQC спектра, а отнесение сигналов в спектре к конкретным атомам водорода сделали на основании двумерного  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY спектра. Обнаруженные корреляции представлены на рисунке 2.

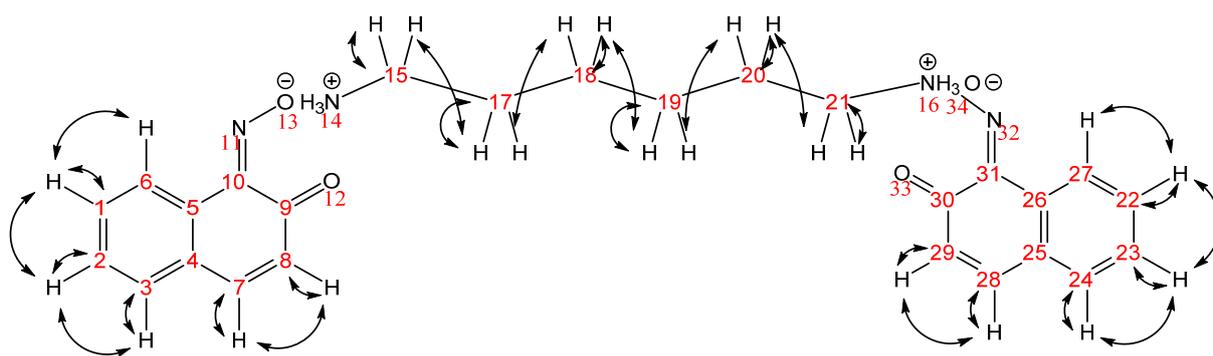


Рис. 2 – Графический анализ двумерных спектров  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HSQC и  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY (ДМСО- $d_6$ )

По соотношению интегральных интенсивностей сигналов протонов гексаметиленового фрагмента и нафталиновых циклов в образовании соли участвуют обе аминогруппы гексаметилендиамина и две молекулы 1-нитрозо-2-нафтола.

По данным ЯМР-спектроскопии (ДМСО- $d_6$ ) соль находится преимущественно в оксимной форме, но наличие малого количества нитрозоформы (2Б) подтверждается данными электронной спектроскопии в ДМСО. Об этом свидетельствует максимум поглощения в области 707 нм,  $\epsilon=89,4$ , характерный для  $n\text{-}\pi^*$  перехода электронов ароматической NO-группы.

*Бис(1-нитрознафтален-2-олат) 1,6-гександиаммония.* 0,5 г (2 моль) 1-нитрозо-2-нафтола растворили в 15 мл пиридина. К раствору добавили 0,174 г гексаметилендиамина, цвет смеси стал темно-зеленым. Перемешивали реакционную массу в течение часа. Зеленый осадок фильтруем на воронке Шотта. Выход 84,1%, зеленый порошок,  $t_{\text{разл}}=130^\circ\text{C}$ . Электронный спектр (ДМСО)  $\lambda_{\text{макс. нм}}$  ( $\epsilon$ ): 707 нм (89,4). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м.д. (ДМСО- $d_6$ ): 1.28 (4H,  $\gamma\text{-CH}_2$ ), 1.49 (4H,  $\beta\text{-CH}_2$ ), 2.73 (4H,  $\alpha\text{-CH}_2$ ), 6.58 (2H,  $\text{H}^8$ ,  $\text{H}^{29}$ ), 7.24 (2H,  $\text{H}^2$ ,  $\text{H}^{23}$ ), 7.37 (2H,  $\text{H}^1$ ,  $\text{H}^{22}$ ), 7.47 (2H,  $\text{H}^3$ ,  $\text{H}^{24}$ ), 7.60 (2H,  $\text{H}^7$ ,  $\text{H}^{28}$ ), 9.37 (2H,  $\text{H}^6$ ,  $\text{H}^{27}$ ). Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta$ , м.д. (ДМСО- $d_6$ ): 25.90 ( $\gamma\text{-CH}_2$ ), 28.47 ( $\beta\text{-CH}_2$ ), 39.55 ( $\alpha\text{-CH}_2$ ), 125.89 ( $\text{C}^2$ ,  $\text{C}^{23}$ ), 128.30 ( $\text{C}^3$ ,  $\text{C}^{24}$ ), 130.87 ( $\text{C}^1$ ,  $\text{C}^{22}$ ), 130.89 ( $\text{C}^8$ ,  $\text{C}^{29}$ ), 141.97 ( $\text{C}^7$ ,  $\text{C}^{28}$ ).

Таким образом, нами было получена ранее неизвестная гександиаммониевая соль 1-нитрозо-2-нафтола. Строение полученного соединения изучено способами электронной и ЯМР-спектроскопии.

**Библиографические ссылки**

1. 3-Alkyl-2-aryl-3*H*-naphth[1,2-*d*]imidazoles, a Novel Class of Nonacidic Antiinflammatory Agents / Toja E., Selva J.D., Schiatti P. // *J. Med. Chem.* 1984. Vol.27. №5. P. 610-616.
2. Anti-hypertensives: 1-alkyl-2-arylpiperazinoethyl-1*H*-naphth[1,2-*d*]imidazoles / Toja E., Francesco G.D., Barone D., Baldoli E., Corsico N., Tarzia G. *Eur. // J. Med. Chem.* 1987. Vol.22. №3. P.221-228.
3. Беляев Е.Ю., Гидаспов Б.В. Ароматические нитрозосоединения. Санкт-Петербург, Теза, 1996. 208 с.
4. Синтез нитрозо- и аминопроизводных *N*-ариламиноалкиладамантанов / Е.С. Семиченко, А.Л. Гомонова, Н.А. Гаврилова и др. // *ЖОрХ.* 2008. Т.44. Вып. 5. С.659-662
5. Синтез и спектральные исследования солей хинонмоно- и диоксимов / А.П. Авдеенко, Н.М. Глиняная, В.В. Пироженко // *ЖОрХ.* 1999. Т.35. Вып.10. С.1512-1519

**References**

1. 3-Alkyl-2-aryl-3*H*-naphth[1,2-*d*]imidazoles, a Novel Class of Nonacidic Antiinflammatory Agents / Toja E., Selva J.D., Schiatti P. // *J. Med. Chem.* 1984. Vol.27. №5. P. 610-616.
2. Anti-hypertensives: 1-alkyl-2-arylpiperazinoethyl-1*H*-naphth[1,2-*d*]imidazoles / Toja E., Francesco G.D., Barone D., Baldoli E., Corsico N., Tarzia G. *Eur. // J. Med. Chem.* 1987. Vol.22. №3. P.221-228.
3. Belyaev E. Yu., Gidasov B.V. *Aromatic nitrosoedineniya* [Aromatic nitroso compounds]. Saint-Petersburg, Teza, 1996. 208 p.
4. *Sintez nitrozo- i aminoproizvodnyh N-arilaminoalkiladamantanov* [Synthesis of nitroso- and amino-derivatives of *N*-aryl aminoalkyladamantane] / E.S. Semichenko, A.L. Gomonova, N.A. Gavrilovala [et al] // *J. Org. Chem.* Vol.44. №5 P. 659-662 (In Russ)
5. *Sintez i spectral'nye issledovaniya soley hinonmono- i dioksimov* [Synthesis and spectral analysis of salts of hinonmono- and dioximuses] / A.P. Avdeenko, N. M. Glinyanyaya, V.V. Pirozhenko // *J. Org. Chem.* 1999. Vol. 35. №10. P.1512-1519.

© Дюрба Н. П., Вдовина Е. Р., Ившина В. В., Гаврилова Н. А., 2023

УДК 546.34+546.284; 542.468

## ВЫДЕЛЕНИЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ ШЛАМОВ СПОДУМЕНОVOГО КОНЦЕНТРАТА МЕТОДОМ АВТОКЛАВНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

А. А. Кондрасенко<sup>1,2</sup>, И. В. Королькова<sup>1</sup>, К. П. Жилин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Химико-металлургический завод»,  
Российская Федерация, 660079, г. Красноярск, ул. Александра Матросова, зд. 30, стр. 49

<sup>2</sup> Институт химии и химической технологии СО РАН  
660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50 стр. 24  
E-mail: korolkova@khmz.ru

*Показано, что выделение оксида кремния из шламов сподуменового концентрата методом автоклавного выщелачивания возможно со степенью извлечения до 60 % при ведении процесса при температуре 130 °С при отсутствии магнитных примесей.*

*Ключевые слова: автоклавное выщелачивание, шлам сподуменового концентрата, оксид кремния.*

## EXTRACTION OF SILICA FROM SPODUMENE LEACHING RESIDUE BY AUTOCLAVE DIGESTION METHOD

A. A. Kondrasenko<sup>1,2</sup>, I. V. Korolkova<sup>1</sup>, K. P. Zhilin<sup>1</sup>

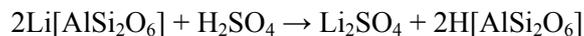
<sup>1</sup> Joint Stock Company “Chemical Metallurgical Plant”  
30, Alexandra Matrosova str., Building 49, Krasnoyarsk, Russia, 660079

<sup>2</sup> Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS,  
50, Akademgorodok str., Krasnoyarsk, Russia, 660036,  
E-mail: korolkova@khmz.ru

*It was shown that silica can be extracted from spodumene leaching residue by hydrothermal treatment. Process yield extraction rates up to 60 % at temperatures 130 °C if initial material was magnetically separated.*

*Keywords: autoclave digestion, spodumene leaching residue, silica*

В настоящее время на АО «ХМЗ» реализуется проект получения карбоната лития в результате переработки из сподуменового концентрата по сернокислотной схеме:



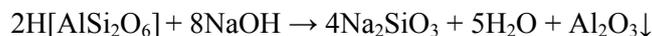
В результате данного процесса образуется большое количество шлама состава  $\text{H}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$ , содержание оксида кремния в котором составляет не менее 60 %.

Целью настоящей работы являлось определение возможности выделения из шламов оксида кремния методом автоклавного выщелачивания.

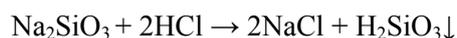
Процесс вскрытия шламов проводился в настольном миниреакторе 5500 фирмы Parr (США) при различных температурах (95–150 °С) в течение 2 ч. Вскрытие выполняли раствором гидроксида натрия с концентрацией 120 г/л по  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Тестовым испытаниям подвергались: шлам, полученный после извлечения лития из сподуменового концентрата, и шлам, дополнительно очищенный от магнитных примесей.

При выщелачивании шламов раствором гидроксида натрия протекает следующая химическая реакция:



Полученную суспензию шлам-раствор разделяли, затем из фильтрата соляной кислотой осаждали кремний:



Осадок кремниевой кислоты отделяли и затем прокаливали в муфельной печи при температуре 600 °С для получения оксида кремния:



Массы полученного оксида кремния и рассчитанные значения степени извлечения представлены в Таблице 1.

Таблица 1

**Масса осадка оксида кремния**

№ п/п	Температура процесса, °С	Масса осадка, г	Степень извлечения SiO <sub>2</sub> , %
Шлам, полученный после извлечения лития из сподуменового концентрата			
1	95	2,81	23,4
2	110	4,32	36,0
3	130	5,14	42,8
4	150	3,45	28,8
Шлам, дополнительно очищенный от магнитных примесей			
5	95	6,60	55,0
6	110	6,68	55,7
7	130	6,99	58,3
8	50	6,52	54,3

Из приведенных в Таблице 1 данных видно, что повышение температуры от 95 °С до 130 °С приводит к увеличению выхода полезного продукта, однако дальнейшее повышение температуры до 150 °С снижает степень извлечения оксида кремния. Следует отметить, что степень извлечения полезного компонента методом автоклавного выщелачивания варьируется в диапазоне от 20 до 60 %, при этом наибольшая степень извлечения оксида кремния при использовании шлама сподуменового концентрата очищенного от магнитных примесей, оптимальной при этом является также температура 130 °С.

© Кондрасенко А. А., Королькова И. В., Жилин К. П., 2023

УДК 544.473-039.63

## РАЗРАБОТКА ОДНОСТАДИЙНОГО СИНТЕЗА ОХЛАЖДАЮЩЕГО АГЕНТА – МЕНТОЛА ИЗ ЦИТРАЛЯ

Д. А. Корешкова<sup>1,2\*</sup>, И. Л. Симакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20

<sup>2</sup> Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН  
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр-кт Академика Лаврентьева, 5

\* E-mail: 24.koreshkova.diana.02@mail.ru

E-mail: simakova@catalysis.ru

*Изучение каскадного превращения цитраля в присутствии бифункциональных никелевых катализаторов в рацементол, потенциальный охлаждающий агент для двигателей.*

*Ключевые слова: бифункциональный катализатор; каскадный синтез; цитраль; ментол; возобновляемое сырье*

## DEVELOPMENT OF «ONE-POT» SYNTHESIS OF COOLING AGENT – MENTHOL FROM CITRAL

D. A. Koreshkova<sup>1,2\*</sup>, I. L. Simakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University  
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup> Borekov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the RAS  
5, Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

\* E-mail: 24.koreshkova.diana.02@mail.ru

E-mail: simakova@catalysis.ru

*Study of the «one-pot» synthesis of menthol – a potential engine coolant from citral over bifunctional nickel catalysts.*

*Keywords: bifunctional catalyst; cascade synthesis; citral; menthol; renewable raw materials*

В настоящее время актуальной задачей является разработка и оптимизация одностадийного синтеза ментола и его производных из возобновляемого сырья – цитраля. Устойчивый интерес к усовершенствованию каскадного превращения обусловлен нехваткой натурального ментола, используемого в медицине, фармацевтике и других немаловажных отраслях, ментол может быть использован как охлаждающий агент камеры сгорания двигателя.

Для осуществления эффективного синтеза ментола был приготовлен бифункциональный катализатор Ni на цеолите [1-5]. Выбор данного катализатора объясняется экономическими соображениями, а также присутствием гидрирующей и кислотной функций, необходимых для гидрирования связей – C=O, –C=C- и циклизации цитронеллала.

Гидрирование цитраля (цис/транс=1/1,95) в растворе циклогексана (0,086 М, 15 мл) проводили в автоклаве при T=70° и P<sub>H<sub>2</sub></sub>=10 ати в присутствии предварительно восстановленного в течение 3 часов Ni композита (150 мг) при 450°. Композит 11%Ni на Beta цеолите допированный бентонитом (в соотношении 7/3), получали методом пропитки раствором нитрата никеля. Количественный анализ осуществляли методом ГЖХ, а идентификацию продуктов проводили методом ГХ-МС. Катализаторы изучены следующими физико-химическими методами: ПЭМ, РФА, ТПВ, ТПД-NH<sub>3</sub>, физадсорбция N<sub>2</sub>, ИК-спектроскопия.

В ходе исследования был разработан Ni катализатор и найдены условия, обеспечивающие высокий выход ментола (около 74%, начало выхода зафиксировано на отметке 30 минут), а также высокая степень превращения цис- и транс- изомеров цитраля (98%) за 180 минут (рис. 1).

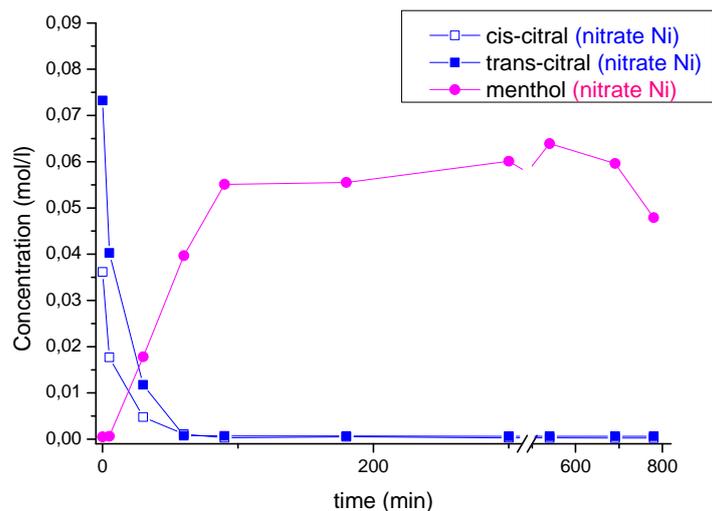


Рис. 1. Кинетические кривые гидрирования цис- /транс-цитрала и ментола в присутствии Ni катализатора

### Библиографические ссылки

1. Cortes, C. B., Galvan, V. T., Pedro, S. S. et al. One pot Synthesis of Menthol from ( $\pm$ )-Citronellal on Nickel Sulfated Zirconia Catalysts. *Catal. Today* 2011, 172, 21-26.
2. Deliy I. V., Danilova I. G., Simakova I. L. et al Tuning Selectivity through the Support in the Hydrogenation of Citral over Copper Catalysts // *Catalysis of Organic Reactions: 22nd Conference, Chem. Ind. – Boca Raton, Florida, 2009. – Vol. 123. – P. 87-92.*
3. Negoii, A., Teinz, K., Kemnitz, E. et al. Bifunctional Nanoscopic Catalysts for the One-Pot Synthesis of ( $\pm$ )-Menthol from Citral. *Topics in Catalysis* 2012, 55(7), 680-687.
4. Simakova I. L., Vajglová Z., Martínez-Klimov M. et al. One-Pot Synthesis of Menthol from Citral over Ni/H- $\beta$ -38 Extrudates Containing Bentonite Clay Binder in Batch and Continuous Reactors // *Organic Process Research and Development: General. – 2023. – V. 27. – P. 295-310.*
5. Simakova I., Mäki-Arvela P., Martinez-Klimov M. Continuous synthesis of menthol from citronellal and citral over Ni-beta-zeolite-sepiolite composite catalyst// *Applied Catalysis A: General. – 2022. – V. 636. – P. 118586.*

### References

1. Cortes, C. B., Galvan, V. T., Pedro, S. S. et al. One pot Synthesis of Menthol from ( $\pm$ )-Citronellal on Nickel Sulfated Zirconia Catalysts. *Catal. Today* 2011, 172, 21-26.
2. Deliy I. V., Danilova I. G., Simakova I. L. et al Tuning Selectivity through the Support in the Hydrogenation of Citral over Copper Catalysts // *Catalysis of Organic Reactions: 22nd Conference, Chem. Ind. – Boca Raton, Florida, 2009. – Vol. 123. – P. 87-92.*
3. Negoii, A., Teinz, K., Kemnitz, E. et al. Bifunctional Nanoscopic Catalysts for the One-Pot Synthesis of ( $\pm$ )-Menthol from Citral. *Topics in Catalysis* 2012, 55(7), 680-687.
4. Simakova I. L., Vajglová Z., Martínez-Klimov M. et al. One-Pot Synthesis of Menthol from Citral over Ni/H- $\beta$ -38 Extrudates Containing Bentonite Clay Binder in Batch and Continuous Reactors // *Organic Process Research and Development: General. – 2023. – V. 27. – P. 295-310.*
5. Simakova I., Mäki-Arvela P., Martinez-Klimov M. Continuous synthesis of menthol from citronellal and citral over Ni-beta-zeolite-sepiolite composite catalyst// *Applied Catalysis A: General. – 2022. – V. 636. – P. 118586.*

УДК 665.6/.7

## ПЕРЕРАБОТКА БУРОВЫХ ШЛАМОВ ТЕРМОЛИЗОМ\*

А. С. Косицына<sup>1</sup>, Т. М. Корякова<sup>2</sup>, В. А. Сафин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\* E-mail: skositsyna@sfu-kras.ru

*Экспериментально предложены параметры утилизацией бурового шлама со шламохранилищ нефтяных месторождений пиролизом.*

*Ключевые слова: буровой шлам, пиролиз, зола, жидкие углеводороды*

## PROCESSING OF DRILLING MUDS BY THERMOLYSIS

A. S. Kositsyna<sup>1</sup>, T. M. Koryakova<sup>2</sup>, V. A. Safin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\* E-mail: skositsyna@sfu-kras.ru

*The parameters for the utilization of drill cuttings from sludge storage facilities of oil fields by pyrolysis have been experimentally substantiated.*

*Ключевые слова: drilling mud, pyrolysis, ash, liquid hydrocarbons*

Проблема накопления и утилизации нефтесодержащих шламов является актуальной задачей для всех нефтедобывающих стран и их регионов. По разным оценкам, объем накопления только бурового шлама на одном месторождении Восточной Сибири составляет 36 тыс. тон в год [1]. В среднем, содержание нефти в шламах различного происхождения достигает 40%, что не только приводит к экономическим издержкам, но также вызывает значительные негативные последствия в случае их попадания в природную среду. Поэтому актуальной задачей является поиск экологически и энергетически рациональных технологий по извлечению органических компонентов из буровых и нефтешламов, а также их обезвреживания (в частности, снижение содержания углеводородов нефти и тяжелых металлов).

Основными методами утилизации буровых и нефтешламов являются механическая сепарация и термолиз.

На текущей стадии работ произведен отбор образцов бурового шлама с месторождения Красноярского края (используется буровой раствор на нефтяной основе). Проведено его исследование, проведены эксперименты по термолизу образцов шлама при различных температурах. Выполнен анализ образующихся газообразных, жидких и твердых продуктов.

---

\* Исследования выполнены по государственному заданию Минобрнауки России по проекту «Разработка комплекса научно-технических решений в области создания биотоплив и оптимальных биотопливных композиций, обеспечивающих возможность трансформации потребляемых видов энергоносителей в соответствии с тенденциями энергоэффективности, снижения углеродного следа продукции и использования видов топлива альтернативных ископаемому» (Контракт FSRZ-2021-0012) в научной лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета, созданной в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь».

Исследования показали, что в среднем буровой шлам в шламохранилищах содержит 14-18% углеводородов нефти и около 4-5 % воды, остальное – минеральная фаза. Состав минеральной фазы определяли методом рентгенофазового анализа на базе Центр коллективного пользования СФУ «Научно-исследовательские методы исследования и анализа новых материалов, наноматериалов и минерального сырья». Установлено, что минеральная составляющая бурового шлама содержит преимущественно породу (доломит 69-73%, кварц до 10%), остальное – количество ангидрита и глинистых минералов, большей частью привнесенных с буровым раствором.

Эксперименты по термолизу образцов бурового шлама показали, что выход золы при температурах пиролиза до 520 °С практически не меняется и составляет 82-85% масс. Повышение температуры от 520 до 600 °С приводит к снижению выхода твердого остатка и резкому росту выхода газа – в среднем на 10%, что может быть связано с разложением доломита и выделением CO<sub>2</sub> в газообразной форме (рис. 1). Жирная часть газа термолиза была представлена углеводородами C3-C4 с незначительным содержанием метана и этилена.

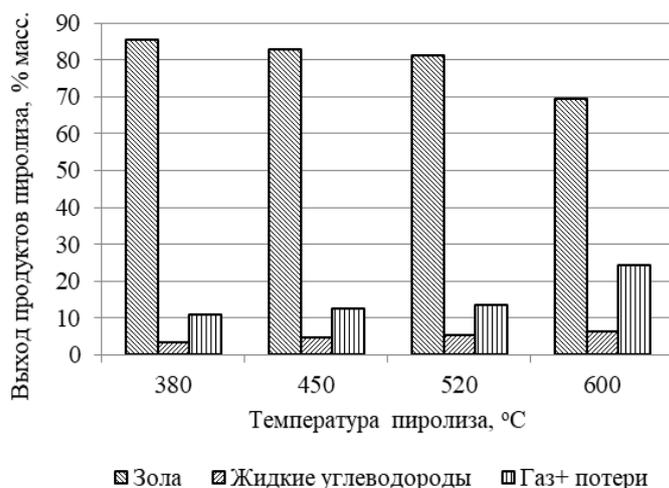


Рис. 1 Материальный баланс процесса пиролиза бурового шлама при разных температурах

При этом содержание углеводородов нефти в буровом шламе снижается и составляет при пиролизе при температуре 200 °С – в среднем 5,2 % масс., 380 °С – 1,1-1,3 % масс., 480 °С и выше – не более 0,03 % масс. и далее практически не изменяется. С учетом требований экологического законодательства при содержании углеводородов нефти в почве не более 0,03%, температуру термолиза от 480 °С можно считать достаточной.

Таким образом, при подборе оптимальных параметров термолиза бурового шлама показано, что минимальной достаточной температурой является диапазон 450-500 °С.

### Библиографическая ссылка

1. Климова А. А. Комплексная эколого-геохимическая оценка бурового шлама нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений Томской и Иркутской областей: дис. ... геол.-мин. ист. наук. Томск : ТПУ, 2021. 206 с.

### Reference

1. Klimova A. A. *Kompleksnaya ekologo-geohimicheskaya ocenka burovogo shlama neftyanyh i neftega-zokondensatnyh mestorozhdenij Tomskoj i Irkutskoj oblastej* [Comprehensive environmental and geochemical assessment of drill cuttings from oil and oil and gas condensate fields of the Tomsk and Irkutsk regions. Dr. geol.-min. sci. diss]. Tomsk, TPU Publ., 2021, 206 p.

© Косицына А. С., Корякова Т. М., Сафин В. А., 2023

УДК 665.642.2

## АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ МЯГКОГО КРЕКИНГА КОММЕРЧЕСКИХ ПОЛИОЛЕФИНОВ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ\*

А. С. Косицына<sup>1</sup>, С. С. Косицына<sup>2</sup>, В. А. Сафин<sup>2</sup>, Ф. А. Бурюкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\* E-mail: skositsyna@sfu-kras.ru

*В работе представлены результаты анализа продуктов мягкого крекинга отходов полиэтилена высокого давления, полипропилена в стационарном слое методом ИК-спектроскопии.*

*Ключевые слова: полиэтилен, полипропилен, термогравиметрия, ИК-спектроскопия*

## ANALYSIS OF SOFT CRACKING PRODUCTS OF COMMERCIAL POLYOLEFINS BY IR SPECTROSCOPY

A. S. Kositsyna<sup>1</sup>, S. S. Kositsyna, V. A. Safin<sup>2</sup>, F. A. Buryukin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\* E-mail: skositsyna@sfu-kras.ru

*The paper presents the results of the analysis of products of soft cracking of waste low-density polyethylene and polypropylene in a stationary layer using IR spectroscopy.*

*Ключевые слова: polyethylene, polypropylene, thermogravimetric analysis, IR spectroscopy*

Необходимость поиска технологически простой технологии переработки пластиковых отходов в востребованную продукцию не вызывает сомнений. Вторичной переработке в мире подвергается не более 20% полиолефинов [1], и основными направлениями ресайклинга остаются вторичное использование и рекуперация (сжигание). Химическая переработка, в том числе девулканизация (полиолефины перерабатываются до мономерного или промежуточного сырья), газификация, метанолиз, гликолиз, гидролиз, пиролиз, гидрирование и аммонолиз – остается наименее развитым вариантом.

С целью поиска актуальных вариантов переработки выполнены работы по термической деструкции отходов полиэтилена высокого давления (преимущественно стрейч-пленка и упаковка) и полипропилена (шнур, тара, упаковка). Скорость нагрева и температуры выбирались на основе термогравиметрического анализа (рис. 1). Мягкий крекинг выполняли в стационарном слое без доступа возду-

---

\* Исследования выполнены по государственному заданию Минобрнауки России по проекту «Разработка комплекса научно-технических решений в области создания биотоплив и оптимальных биотопливных композиций, обеспечивающих возможность трансформации потребляемых видов энергоносителей в соответствии с тенденциями энергоэффективности, снижения углеродного следа продукции и использования видов топлива альтернативных ископаемому» (Контракт FSRZ-2021-0012) в научной лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета, созданной в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь».

Работы выполнены при участии Центра коллективного пользования СФУ «Наукоемкие методы исследования и анализа новых материалов, наноматериалов и минерального сырья».

ха в реакторе из нержавеющей стали. Дистиллируемые продукты анализировали методом ИК-спектроскопии. На рис. 2 в качестве примера приведены некоторые спектры продуктов термоллиза полиэтилена (ПЕ) и полипропилена (ПП).

Из полученных ИК-спектров видно, что продукты пиролиза сохраняют особенности строения изначальных полимеров. Так, в спектрах пиролизного полиэтилена значительно выражены полосы поглощения, характерные для  $\text{CH}_2$ -групп ( $1380, 2920 \text{ см}^{-1}$ ), а также присутствует дуплет в области деформационных колебаний  $-\text{CH}_2-$  цепочек ( $720-740 \text{ см}^{-1}$ ). В спектрах пиролизного полипропилена интенсивно выражены полосы поглощения, характерные для метильных групп ( $1375, 1450 \text{ см}^{-1}, 2870, 2950 \text{ см}^{-1}$ ). В целом, интенсивность полос поглощения, характерных для  $\text{CH}_2$ -групп в среднем в два раза более выражена в продуктах пиролиза ПЕ, а полос поглощения, характерных для  $\text{CH}_3$ -групп – в продуктах переработки ПП.

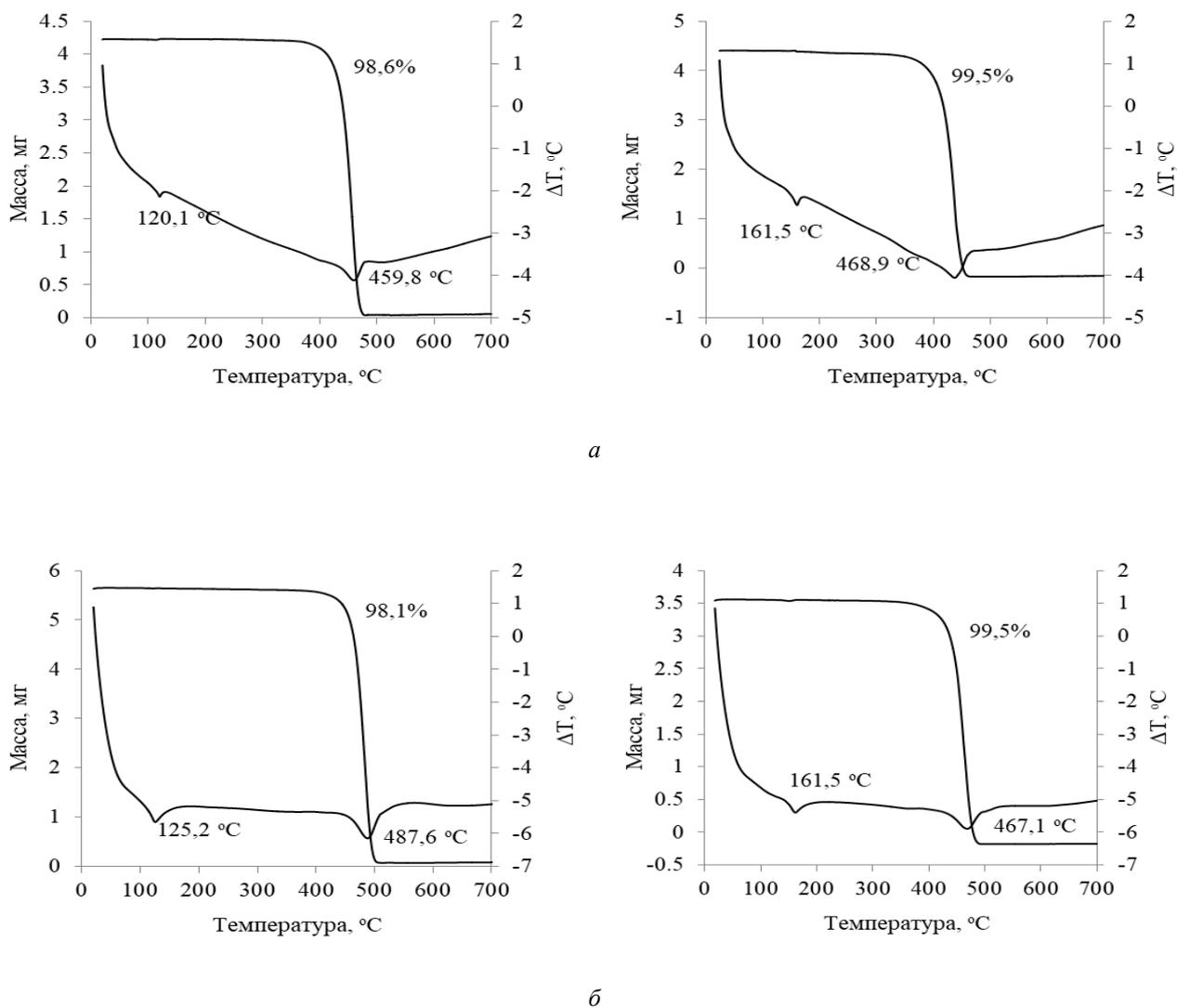


Рис. 1 Результаты термогравиметрического анализа полиэтилена (верхний ряд) и полипропилена (нижний ряд) в инертной среде при разной скорости нагрева: а – 5 °С, б – 20 °С

Полосы поглощения в областях, типичных для двойных связей ( $1640-1650 \text{ см}^{-1}$ ), в исследованных образцах имеют небольшую интенсивность. С учетом наличия сигналов с области  $887 \text{ см}^{-1}$  и  $3070 \text{ (ПП)}$  и  $3075 \text{ (ПЕ)}$   $\text{см}^{-1}$  (деформационные и валентные колебания связей  $\text{C}=\text{H}$  при двойной связи) можно говорить о преимущественно концевом положении кратных связей. Интенсивность полос поглощения, характерных для двойных связей в продуктах термоллиза ПП в среднем в два раза выше, чем в продуктах крекинга ПЕ.

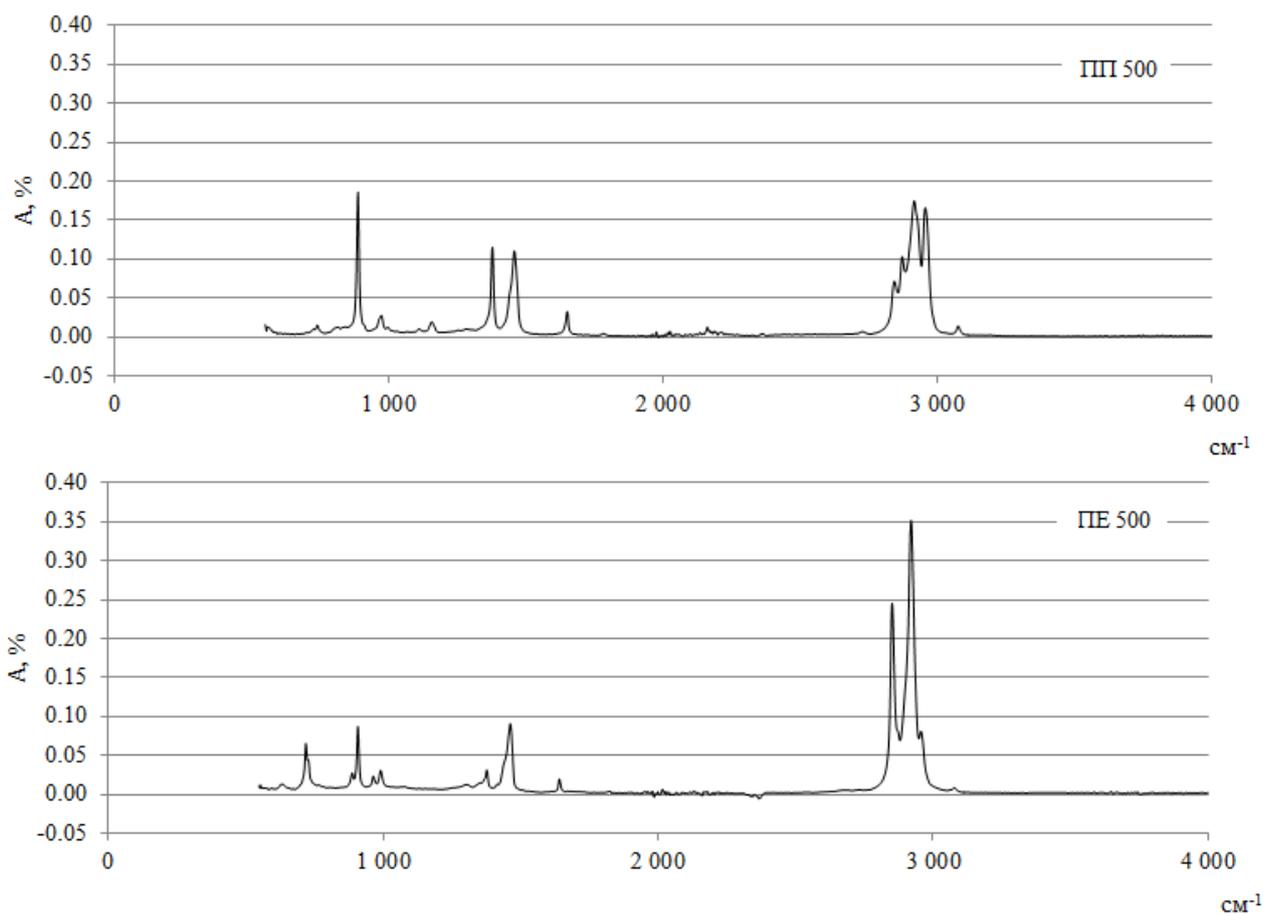


Рис. 2 – ИК-спектры образцов дистиллируемых продуктов крекинга полипропилена (ПП) и полиэтилена (ПЕ) при 500 °С

### Reference

1. Jubinville D., Esmizadeh E., Saikrishnan S., Tzoganakis C., Mekonnen T. A comprehensive review of global production and recycling methods of polyolefin (PO) based products and their post-recycling applications // Sustainable Materials and Technologies – 2020. – Vol. 25. – e00188.

© Косицына А. С., Косицына С. С., Сафин В. А., Бурюкин Ф. А., 2023

УДК 541.127:662.1

## ТЕРМОЛИЗ 1,3,5,7-ТЕТРАНITPO-1,3,5,7-ТЕТРААЗАЦИКЛООКТАНА В ПРИСУТСТВИИ ДИОКСИДА ТИТАНА

Л. А. Круглякова, К. В. Пехотин\*, О. А. Голубцова, А. В. Держаева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: pekhotinkv@sibsau.ru

*Термолиз 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ), энергетического компонента твердых ракетных топлив, происходит при более низких температурах в присутствии диоксида титана.*

*Ключевые слова: 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктан, термолиз, диоксид титана, кинетические параметры.*

## THERMOLYSIS OF 1,3,5,7-TETRANITRO-1,3,5,7-TETRAAZACYCLOOCTANE IN THE PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE

L. A. Kruglyakova, K. V. Pekhotin\*, O. A. Golubtsova, A. V. Derzhaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: pekhotinkv@sibsau.ru

*Thermolysis of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane (HMX), the energetic component of solid rocket propellants, occurs at lower temperatures in the presence of titanium dioxide.*

*Keywords: thermal decomposition, catalysis, 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane, lead dioxide.*

**Введение.** Гетерогенные катализаторы на основе металлов переменной валентности и их оксидов широко используются в различных каталитических процессах, протекающих по окислительно-восстановительному механизму. В этой связи исследование влияния оксидов металлов на термическое разложение и горение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ) и содержащих нитраминами твердых ракетных топлив является актуальной задачей. В продолжение работ [1-3] изучен термолиз НМХ с добавками диоксида титана в неизотермических условиях при разных скоростях нагрева образцов с целью установления влияния скорости нагревания на температуры начала и интенсивного разложения и определения активационных параметров процесса.

**Результаты и их обсуждение.** Образец для исследования получали путем совместной кристаллизации из ацетона. Соотношение НМХ:добавка составляло 95:5 (масс. ч.). Термолиз НМХ с добавкой диоксида титана проводили в неизотермических условиях на дериватографе Q-1500D при скоростях нагревания 1,25; 2,5; 5 и 10 К/мин от комнатной температуры до 500°C. Масса навески составляла 20 мг.

Исследование показало, что как чистый НМХ, так и образец с добавкой TiO<sub>2</sub> разлагаются в твердой фазе. На кривых убыли веса при всех скоростях нагревания можно выделить несколько стадий: нагрев без изменения массы образца и тепловых эффектов; медленная убыль массы (не более чем 3-5 %), переходящая в стадию быстрой потери массы (до 95-98%) с выраженным экзотермическим эффектом, и заключительная стадия, на которой масса образца практически не меняется с ростом температуры. Термограмма процесса при скорости нагрева 10 К/мин представлена на рис. 1. На рис. 2 приведены сравнительные кривые ДТА для чистого НМХ и НМХ с добавкой TiO<sub>2</sub> и изученного ранее MnO<sub>2</sub> [3].

Найденные из дифференциальных кривых тепловыделения температуры начала, T<sub>нр</sub>, и интенсивного разложения, T<sub>max</sub>, (соответствующие максимуму на кривой теплового эффекта), а также расчи-

танные методами Озава [4] и Киссинджера [5] по зависимости  $T_{\max}$  от скорости нагрева активационные параметры приведены в таблице. Здесь же представлены данные для НМХ без добавок.

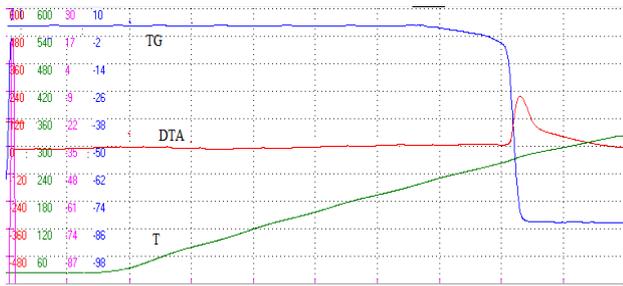


Рис. 1. Термограмма образца с добавкой диоксида титана при скорости нагрева 10 К/мин

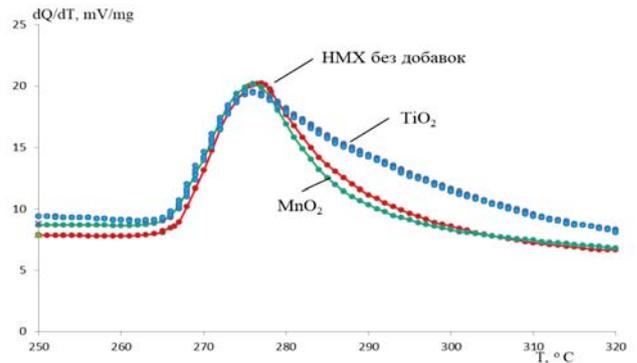


Рис. 2. Кривые ДТА при скорости нагрева 10 К/мин НМХ без добавок и с добавками  $\text{TiO}_2$  и  $\text{MnO}_2$

Таблица

**Характеристические температуры и активационные параметры термораспада НМХ с добавкой в неизотермических условиях**

Добавка	Скорость нагрева, К/мин	$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$E$ [кДж/моль]		$\lg A$ (метод Киссинджера)
				метод Озава	метод Киссинджера	
без добавки	2,5	254	262,5	213,9	211,9	20,29
	5,0	256	266,5			
	10,0	262	276			
$\text{TiO}_2$	2,5	252	258	188,7	176,7	18,40
	5	262	269			
	10	266	275			

Из рис. 2 и данных таблицы видно, что добавка  $\text{TiO}_2$  несколько снижает температуры начала и интенсивного разложения НМХ и уменьшает интервал между ними. Последнее приводит к существенному снижению энергии активации термораспада.

Ранее в работе [1] было установлено увеличение каталитического действия с ростом концентрации и степени дисперсности диоксида титана. Авторы связывали это с влиянием на механизм и скорость распада НМХ паров воды, адсорбированной на поверхности кристаллов  $\text{TiO}_2$  и выделяющейся в ходе нагревания. В то же время в работах [2, 3] было показано, что металлы переменной валентности способствуют интенсификации окислительно-восстановительных процессов при термолитзе НМХ, при этом найдена тенденция снижения  $T_b$  и  $T_{\text{max}}$  с увеличением степени окисления (потенциала ионизации) металла. Полученные нами результаты свидетельствуют о более высокой активности диоксида титана по сравнению с изученными ранее оксидами марганца, кобальта и ванадия.

Кинетические параметры термолитза могут использоваться для прогноза термической стабильности НМХ, модифицированного добавкой  $\text{TiO}_2$ , и подбора технологического режима процесса получения и условий эксплуатации составов с этим компонентом.

**Библиографические ссылки**

1. Муравьев Н. В., Пивкина А. Н., Стрелецкий А. Н. Влияние диоксида титана на термическое разложение октогена // Горение и взрыв. 2013. № 6. С. 195-200.
2. Термолитз октогена в присутствии оксидов металлов / Круглякова Л.А., Пехотин К.В., Голубцова О.А., Тагильцева В.Ю. // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву, Суздаль, 4–9 сентября 2022 г. С. 77-78.
3. Влияние диоксида марганца на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазаацетоктана / Попов М. А., Дударева Е. Д., Круглякова Л. А., Пехотин К. В. // Материалы VI

Международной научно-практической конференции творческой молодежи "Актуальные проблемы авиации и космонавтики" (12-16 апреля 2021 года, г. Красноярск). Т.1. С.457-459.

4. Ozawa, T. A. New Method of Analyzing Thermogravimetric Data // Bull. Chemical Society of Japan. 1965. P. 1881-1886.

5. Kissinger H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis // Analytical Chemistry. 1957. Vol. 29. N. 11. P. 1702-1706.

### References

1. Muravyev N.V., Pivkina A.N., Streletsky A.N., etc. Effect of titanium dioxide on thermal decomposition of octogen. *Gorenie i Vzryv*, 2013, No. 6, P. 195-200 (In Russ).

2. Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V., Golubtsova O. A., Tagiltseva V. Yu. Thermolysis of octogen in the presence of metal oxides. Abstracts of the XVI All-Russian Symposium on Combustion and Explosion, Suzdal, September 4–9, 2022, P. 77-78. (In Russ.).

3. Popov M. A., Dudareva E. D., Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V. Effect of manganese dioxide on thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane // Materials of the VI International Scientific and Practical Conference of Creative Youth "Actual Problems of Aviation and Cosmonautics" (April 12-16, 2021, Krasnoyarsk). Т.1. S.457-459. (In Russ.).

4. Ozawa, T. A. New Method of Analyzing Thermogravimetric Data // Bull. Chemical Society of Japan. 1965. P. 1881-1886.

5. Kissinger H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis // Analytical Chemistry. 1957. Vol. 29. N. 11. P. 1702-1706.

© Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Голубцова О. А., Держаева А. В., 2023

УДК 547.775

## СИНТЕЗ ЭТИЛ 2-(3,5-ДИМЕТИЛ-4-НИТРОЗО-1Н-ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)ПРОПАНОАТА

К. Ю. Кучина\*, Т. В. Полиенко, А. В. Боброва, Е. В. Роот

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: ku4ina.ksusha@ya.ru

*В результате взаимодействия 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола с этиловым эфиром 2-бромпропионата впервые получен этил 2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)пропаноат. Его строение подтверждено методами ЯМР, УФ и ИК спектроскопии и ВЭЖХ/МС.*

*Ключевые слова:* N-алкилирование, 4-нитрозопиразол, этиловый эфир 2-бромпропионовой кислоты.

## SYNTHESIS OF ETHYL 2-(3,5-DIMETHYL-4-NITROSO-1H-PYRAZOL-1-YL)PROPANOATE

K. Yu. Kuchina\*, T. V. Polienko, A. V. Bobrova, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ku4ina.ksusha@ya.ru

*In the interaction of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with ethyl ether of 2-bromopropionate, ethyl 2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole-1-yl)propanoate was obtained for the first time. Its structure was confirmed by NMR, UV and IR spectroscopy and HPLC/MS.*

*Keywords:* N-alkylation, 4-nitrosopyrazole, ethyl ether of 2-bromopropionic acid.

Пиразолы обладают широким спектром биологической активности и успешно применяются в качестве противомикробных, противосудорожных, противотуберкулезных, противоопухолевых и противовирусных препаратов [1]. Кроме того, пиразолы широко используются в качестве лигандов для гетерогенного металлокомплексного катализа [2, 3]. Стоит отметить, что соединения, содержащие пиразольные фрагменты с нитрозогруппой, активно применяются в онкологии для эффективной борьбы с раковыми заболеваниями [4]. Таким образом, нитрозопиразолы и их производные являются перспективным объектом исследования, а их синтез представляет интерес для химиков-синтетиков.

Исследованиями, проведенными ранее на кафедре ОХТ, установлено, что алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола приводит к получению N-замещенных пиразолов с высокими выходами [5]. Положительные результаты при использовании в качестве реагента этилового эфира монохлоруксусной кислоты вызвали интерес к расширению ряда синтезированных нитрозопиразолов со сложноэфирной группировкой. Поэтому целью данной работы является проведение реакции 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола с этиловым эфиром 2-бромпропионовой кислоты и подтверждение строения полученного соединения с помощью современных физико-химических методов анализа.

Проводили две реакции на основании методик, условия для которых были разработаны ранее [5]. Первый метод (метод А) представлен взаимодействием натриевой соли соответствующего нитрозопиразола с алкилирующим агентом в кипящем ацетоне, а второй (метод Б) заключается в проведении реакции в среде супероснования при комнатной температуре (рис. 1). Выходы целевого продукта после очистки методом колоночной хроматографии составили 43 % и 55 % соответственно.

Значительное снижение выходов по сравнению с полученным этил-2-(3,5-диметил-4-нитрозопиразол-1-ил)ацетатом (метод А – 75 %, метод Б – 84 %) [6] в аналогичных условиях проведения реакции связано со стерическими затруднениями при замещении уходящей группы нуклеофилом. Атакуемый атом углерода в молекуле этилового эфира 2-бромпропионовой кислоты является

вторичным, что создает пространственные препятствия для достижения переходного состояния в механизме бимолекулярного нуклеофильного замещения ( $S_N2$ ), в то время как для первичного атома углерода этилового эфира монохлоруксусной кислоты такой механизм реакции является предпочтительным.

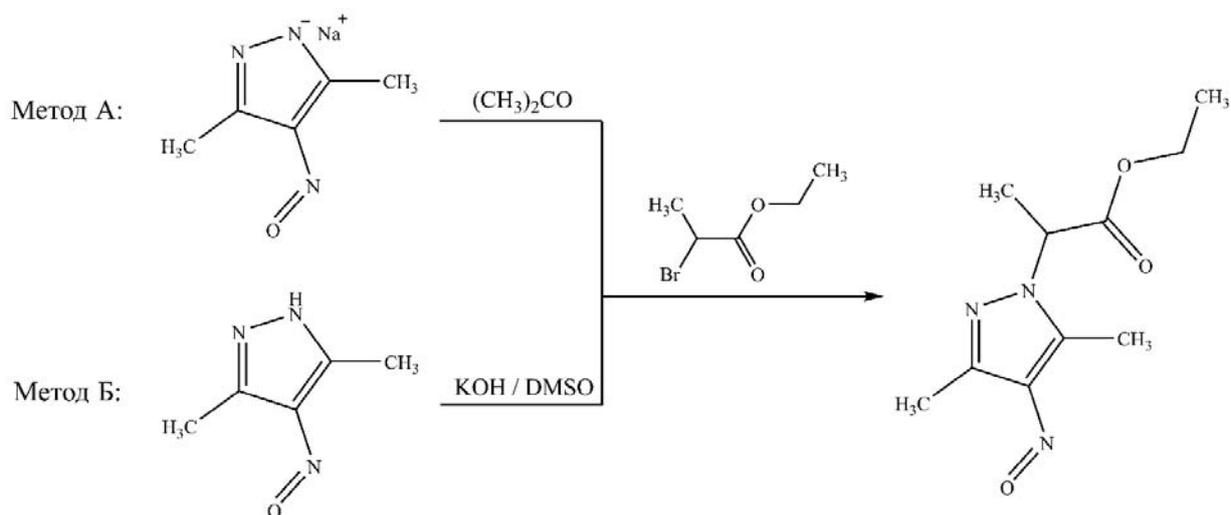


Рис. 1. Схема синтеза этил 2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразол-1-ил)пропаноата

### Экспериментальная часть.

**Метод А.** Навеску натриевой соли 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола (0,24 г, 1,6 ммоль) вводили в 7 мл ацетона, добавляли этиловый эфир 2-бромпропионовой кислоты (0,43 г, 2,4 ммоль). Реакционную массу кипятили с обратным холодильником в течение 3,5 часов. При нагревании смесь меняла окраску с оранжевой на темно-зеленую. Ход реакции контролировали методом ТСХ (гексан:этилацетат 1:1). По истечении указанного времени раствор фильтровали, фильтрат упаривали. Полученный остаток очищали методом колоночной хроматографии (силикагель, гексан:этилацетат (50:5)). Затем элюент упаривали, выделяли продукт с выходом 0,155 г (43%).

**Метод Б.** Навеску 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола (0,20 г, 1,6 ммоль) растворяли в ДМСО (20 мл), вводили измельченный КОН (0,116 г, 2,07 ммоль). Смесь термостатировали в течение 1 часа при температуре 80 °С при перемешивании, затем охлаждали до комнатной температуры и вводили этиловый эфир 2-бромпропионовой кислоты (0,58 г, 3,2 ммоль). Через 5 минут после добавления алкилирующего агента смесь приобрела зеленый цвет. Через 5 часов перемешивания при комнатной температуре реакционную массу разбавляли 600 мл воды и экстрагировали хлороформом (10 мл × 7). Экстракт сушили сульфатом натрия и упаривали. Продукт очищали методом колоночной хроматографии аналогично методу А. Элюент упаривали, выделяли продукт с выходом 0,198 г (55%).

Этил 2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразол-1-ил)пропаноат: кристаллы синего цвета,  $T_{пл} = 44 - 45$  °С; ЯМР  $^1H$  (600 МГц,  $CDCl_3$ ):  $\delta = 4,98$  (кв, 1H), 4,19 – 4,27 (м, 2H), 2,91 (уш. с, 3H), 2,30 (уш. с, 3H), 1,85 (д, 3H), 1,25 (т, 3H); ЯМР  $^{13}C$  (150 МГц,  $CDCl_3$ ):  $\delta = 168.9, 160.4, 62.5, 56.6, 16.3, 14.2, 13.3, 9.9$ ; ИК ( $\nu, cm^{-1}$ ): 1722 (C=O), 1543, 1356 (N=O); электронный спектр ( $CH_3CN$ ):  $\lambda_{max}, nm$  ( $\epsilon$ ): 678 (78); ВЭЖХ/МС (6 кВ):  $m/z$  (%): 225 (29)  $[M]^+$ , 224 (100)  $[M-H]^+$ .

### Библиографические ссылки

1. Katz, AM. A clinical trial of indomethacin in rheumatoid arthritis / AM. Katz, CM. Pearson, JM. Kennedy // Clin Pharmacol Ther. 1965. №6. P. 25–30.
2. Holger, W. Coordination chemistry and catalytic application of bidentate phosphoferrocene-pyrazole and-imidazole based P, N-ligands / W. Holger, F. Walter, G. Christian // J. Organomet. Chem. 2009. Vol. 28, №10. P. 3049-3058.
3. Dinuclear allylpalladium complexes of C2-symmetric pyrazolate-bridged bis(oxazoline) ligands (pyrbox's): structures, dynamic behavior, and application in asymmetric allylic alkylation / F. Arne, S. Connor, J. Michael et al. // J. Organomet. Chem. 2010. Vol. 29. №5. P. 1117-1126.

4. Synthesis, biological evaluation and molecular docking studies of pyrazole derivatives coupling with a thiourea moiety as novel CDKs inhibitors / J. Sun, X-H. Lv, H-Y. Qiu et al. // *Eur. J. Med. Chem.* 2013. Vol. 68. P. 1-9.

5. Изучение алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола 1-бромбутаном / А. В. Боброва, А. Д. Раджабов, Е. В. Роот, Г. А. Субоч // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Всерос. науч.-практ. конф. Сборник статей студентов и молодых ученых. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020. 437-438 с.

6. Голенко Э. И., Боброва А. В., Роот Е. В. Синтез этил-2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразол-1-ил)ацетата // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–11 ноября 2022, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. Ред. Ю. Ю. Логинова ; Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2022. Ч. 1. С. 715-716.

### References

1. Katz AM., Pearson CM., Kennedy JM. A clinical trial of indomethacin in rheumatoid arthritis. *Clin Pharmacol Ther.* 1965, no. 6, P. 25–30.

2. Holger W., Walter F., Christian G. Coordination chemistry and catalytic application of bidentate phosphoferrocene-pyrazole and-imidazole based P, N-ligands. *J. Organomet. Chem.* 2009, vol. 28, no. 10, P. 3049-3058.

3. Arne F., F. Connor F., Michael J. et al. Dinuclear allylpalladium complexes of C2-symmetric pyrazolate-bridged bis(oxazoline) ligands (pyrbox's): structures, dynamic behavior, and application in asymmetric allylic alkylation. *J. Organomet. Chem.* 2010, vol. 29, no. 5, P. 1117-1126.

4. Sun J., Lv X-H., Qiu H-Y. et al. Synthesis, biological evaluation and molecular docking studies of pyrazole derivatives coupling with a thiourea moiety as novel CDKs inhibitors. *Eur. J. Med. Chem.* 2013, vol. 68, P. 1-9.

5. Bobrova A.V., Radjabov A. D., Root E. V., Suboch G. A. [Study of alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole by 1-bromobutane]. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki. Vseros. nauch.-prakt. konf. Sbornik statei studentov i molodykh uchenykh* [Young scientists in solving actual problems of science. All-Russian Scientific and Pract. Conf. Collection of articles by students and young scientists]. Krasnoyarsk, 2020, p. 437-438. (in Russ.)

6. Golenko E. I., Bobrova A.V., Root E. V. [Synthesis of ethyl-2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole-1-yl)acetate]. *Materialy XXVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2022, p. 715-716. (In Russ.)

© Кучина К. Ю., Полиенко Т. В., Боброва А. В., Роот Е. В., 2023

УДК 620.197

## ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЦВЕТ МДО-ПОКРЫТИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В. А. Миронова, А. В. Гирн

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mironova.va@mail.ru

*Рассмотрено влияние компонентов электролита на цветовую гамму покрытия при микродуговом оксидировании. Проведенный краткий анализ позволит оценить влияние состава электролита на формирование покрытий методом микродугового оксидирования.*

*Ключевые слова: переходные металлы, цвет покрытия, микродуговое оксидирование (МДО), электролит.*

## THE EFFECT OF ELECTROLYTE COMPONENTS ON THE COLOR OF THE MDO COATING OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS

V. A. Mironova, A. V. Girn

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mironova.va@mail.ru

*The effect of electrolyte components on the color gamut of the coating during microarc oxidation is considered. A brief analysis will allow us to evaluate the effect of the electrolyte composition on the formation of coatings by microarc oxidation.*

*Keywords: transition metals, coating color, microarc oxidation (MDO), electrolyte.*

Микродуговое оксидирование (МДО) сложный процесс, изменяя параметры которого, можно получать покрытия, необходимые для удовлетворения поставленных задач.

Формируемое покрытие зависит от компонентов, содержащихся в электролите. Переходные металлы, отличающиеся особенностью электронной структуры, значительно влияют на формирование МДО – покрытий [1–6].

Нужно обратить особое внимание на концентрацию d- металлов и их влияние на цвет получаемых анодно-оксидных покрытий. Меняя концентрации соединений переходных металлов в растворах электролитов и режимы микроплазменной обработки можно получать декоративные анодно-оксидные покрытия различного цветов (коричневых, серо-синих, зеленых, голубых). Наблюдается тенденция к увеличению более темных тонов покрытия с возрастанием концентрации d-элементов переходных металлов.

Понижение содержания кремния (<0,6 %) кремния в сплавах алюминия позволяют получить качественные защитно-декоративные покрытия. На сплавах, содержащих большое количество кремния, трудно получить светлые оттенки покрытий (белый, голубой, бежевый. Изменение химического состава оксидных покрытий позволяет создавать оксидные покрытия на алюминии и его сплавах для различных областей применения (авиации, судостроения, катализа, строительства и др.).

Особое внимание уделяется исследованию состава, концентрации компонентов электролита и режимов обработки МДО алюминиевых и титановых сплавов для получения оптически черного светопоглощающего покрытия с высокими физико-механическими характеристиками. Изделия с МДО-покрытием черного цвета могут применяться в ракетно-космической технике.

В работе [7] установлена концентрация компонентов электролита, режимы обработки алюминиевых и титановых сплавов для формирования покрытия черного цвета. В ходе исследования выявлено,

что электролит со следующим составом: кристаллогидрат дигидрофосфата натрия, силикат натрия, гексацианоферрат железа (III), молибдат натрия способствует формированию оптически черного светопоглощающего покрытия

На цвет МДО – покрытий очень важную роль оказывает присутствие переходных металлов (d-элементов) в составе электролитов. При этом необходимо учитывать влияние и других параметров МДО-оксидирования: плотность тока, анодной и катодной составляющих, взаимного расположения электродов, времени процесса и других параметров.

### Библиографические ссылки

1. Влияние технологических параметров на элементный состав микродугового оксидирования покрытий на алюминиевых и титановых сплавах / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Орлова и др. // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 168–172.
2. Суминов И. В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М. : Техносфера, 2011. 512 с.
3. Федоров В. А., Белозеров В. В., Великосельская Н. Д. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 1. С. 87–93.
4. Исследование процесса формирования оптически черных оксидно-керамических покрытий на поверхности алюминиевого сплава 1160 / Ж. И. Беспалова, И. Н. Паненко, В. В. Дубовсков и др. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2012. № 5. С. 63–66.
5. Михеев А. А., Вахтеев Е. В., Орлова Д. В. Анализ способов окрашивания покрытий, получаемых при микродуговом оксидировании на алюминиевых сплавах // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2010, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 9–10.
6. Пат. 2096534 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/14, С 25 D 11/02. Способ получения оптически черных защитных покрытий на вентильных металлах / Яровая Т. П., Руднев В. С., Гордиенко П. С., Недозоров П. М. № 96114575/02; заявл. 18.07.96; опубл. 20.11.97.
7. Сибирский Аэрокосмический журнал. Том 23, № 2. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – 2022. Стр. 305-314 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49184674>

### References

1. Mikheev A. E., Girn A. V., Orlova D. V., Vakhteev E. V., Trushkina T. V. [Influence of technological parameters on the elemental composition of microarc oxidation of coatings on aluminum and titanium alloys]. Vestnik SibGAU. 2012, No. 4 (44), P. 168–172 (In Russ.).
2. Suminov I. V. Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov [Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 512 p.
3. Fedorov V. A., Belozеров V. V., Velikosel'skaya N. D. [Formation of hardened surface layers by microarc oxidation in various electrolytes and when changing current modes]. Fizika i khimiya obrabotki materialov. 1991, No. 1, P. 87–93 (In Russ.).
4. Bespalova Zh. I., Panenko I. N., Dubovskov V. V., Kozachenko P. N., Kudrjavcev Ju. D. [Investigation of the process of formation of optically black oxide-ceramic coatings on the surface of aluminum alloy 1160]. Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki. 2012, No. 5, P. 63–66 (In Russ.).
5. Miheev A. A., Vahteev E. V., Orlova D. V. [Analysis of methods for coloring coatings obtained by micro-arc oxidation on aluminum alloys]. Materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XIV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2010, p. 9–10 (In Russ.).
6. Yarovaya T. P., Rudnev V. S., Gordienko P. S., Nedozorov P. M. Sposob polucheniya opticheski chernykh zashchitnykh pokrytiy na ventil'nykh metallakh [Method for obtaining optically black protective coatings on valve metals]. Patent RF, No. 2096534, 1996.

УДК 547.773 + 547.853

## СИНТЕЗ ПИРИМИДИЛЗАМЕЩЁННОГО 3-МЕТОКСИМЕТИЛ-5-(П-ХЛОРФЕНИЛ)-4-НИТРОЗОПИРАЗОЛА

Д. К. Нижибовская\*, Я. И. Агеев, П. С. Бобров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: nig\_dasha@mail.ru

*Циклоконденсацией замещенного 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-(п-хлорфенил)пропан-1,3-дионом впервые синтезирован 3-метоксиметил-5-(п-хлорфенил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол. Строение полученного соединения подтверждено методом электронной спектроскопии.*

*Ключевые слова: циклоконденсация, пиразол, пиримидин, нитрозопиразол, электронная спектроскопия.*

## SYNTHESIS OF PYRIMIDYL SUBSTITUTED 3-METHOXYMETHYL-5-(P-CHLORPHENYL)-4-NITROSOPYRAZOLE

D. K. Nizhibovskaya\*, Y. I. Ageev, P. S. Bobrov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: nig\_dasha@mail.ru

*This article describes cyclocondensation of 2-hydrazinylpyrimidine with 2-hydroxymino-3-methoxymethyl-1-(p-chlorophenyl)propane-1,3-dione. A previously unknown 3-methoxymethyl-5-(p-chlorophenyl)-4-nitroso-1-(4,6-dimethylpyrimidine-2-yl)pyrazole was obtained for the first time. The UV/Vis spectrum confirms the structure of a previously unknown compound.*

*Keywords: cyclocondensation, pyrazole, pyrimidine, nitrosopyrazole, electron spectroscopy.*

Пиримидилпиразолы и их производные обладают широким спектром полезных свойств. Так, были обнаружены вещества с противотуберкулезной [1], цитопротективной [2], противовоспалительной [3], противовоспалительной [4] и другой биологической активностью.

Модификация нитрозогруппы является самым простым способом получения производных пиразола с азотсодержащими группировками в 4-ом положении пиразольного цикла, которые имеют особое значение для фармацевтической химии. Уже найдены 4-азопиразолы с противоопухолевой активностью [5], и 4-ацетамидопиразолы – с антиглаукомной [6] и противогрибковой активностью [7].

Ранее на нашей кафедре уже были проведены реакции между гетарилгидразинами с изонитрозо- $\beta$ -дикетонами с образованием соответствующих N-гетарил-4-нитрозопиразолов [8-10]. Однако, до сих пор не была изучена циклоароматизация 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-(п-хлорфенил)пропан-1,3-дионом, в результате которой может быть получен неизвестный ранее 3-метоксиметил-5-(п-хлорфенил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол. Поэтому целью настоящей работы стало изучение данной циклоконденсации (рис. 1), а также подтверждение строения продукта реакции.

Для синтеза пиримидилзамещенного 4-нитрозопиразола были получены 2-гидразинил-4,6-диметилпиримидин и 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-(п-хлорфенил)пропан-1,3-дионом по известным методикам.

Циклоконденсация успешно осуществляется в среде уксусной кислоты, схема синтеза которой изображена на рис. 1.

После колоночной хроматографии продукт был перекристаллизован из четыреххлористого углерода с получением бирюзовых кристаллов, растворимых в ацетонитриле, толуоле и хлороформе. Строение впервые синтезированного соединения подтверждено методом электронной спектроскопии (рис. 2).

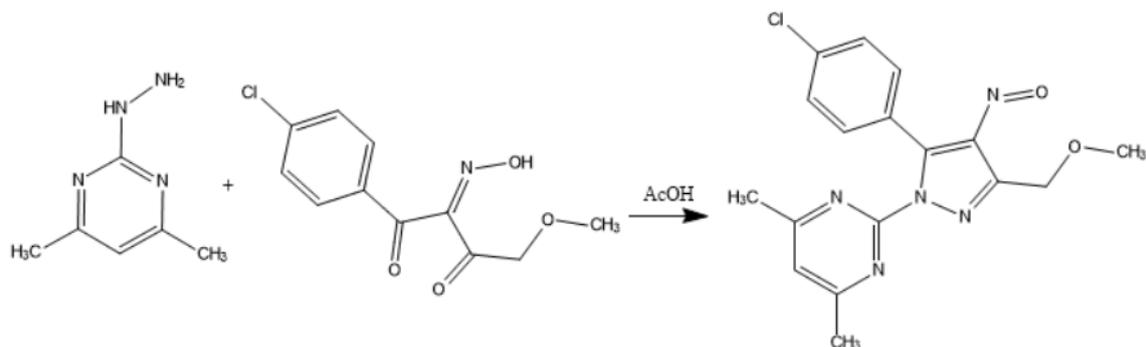
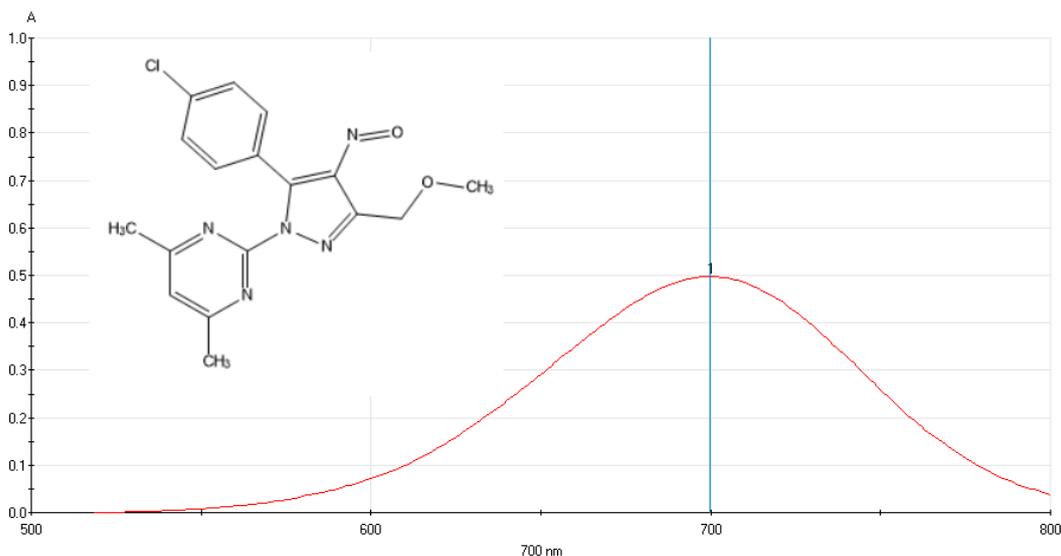


Рис.1. Синтез 3-метоксиметил-5-(п-хлорфенил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразола

Рис. 2. Электронный спектр  
3-метоксиметил-5-(п-хлорфенил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразола

На электронном спектре соединения присутствует максимум поглощения нитрозогруппы в видимой области, обусловленный  $n \rightarrow \pi^*$  переходом неподелённой электронной пары атома азота нитрозогруппы.

#### Экспериментальная часть.

##### *3-Метоксиметил-5-(п-хлорфенил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол*

В колбу загружали при перемешивании 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-(п-хлорфенил)пропан-1,3-дион (0,511 г, 0,002 моль), 2-гидразинил-4,6-диметилпиримидин (0,276 г, 0,002 моль) и 16 мл уксусной кислоты, кипятили при перемешивании. По окончании реакции раствор темно-зеленого цвета охлаждали, выливали в воду. Высаливали при помощи хлорида натрия, после чего экстрагировали хлороформом (20 мл  $\times$  2). Объединённые экстракты промывали 5%-ным раствором соды, затем насыщенным раствором хлорида натрия и сушили над прокаленным сульфатом натрия. Продукт очищали при помощи колоночной хроматографии (элюент – толуол: ацетонитрил = 25: 1). Выход 0,336 г (47,2%), зеленые кристаллы, Т. пл. = 150-152°C. Электронный спектр ( $\text{CHCl}_3$ ),  $\lambda_{(\text{max})}$ , нм ( $\epsilon$ ): 700 (50).

#### Библиографические ссылки

1. U.S. Patent № 3040047, МПК: C07D239/42, C07D239/46, C07D239/48. 2-(Pyrazol-1-yl)-pyrimidine derivatives: № 19600019448 : filed. 04.04.1960 : patented 19.06.1962 / Kenzo Sirakawa – 7 p.
2. Ikeda M. et al. Cytoprotective Effects of 4, 6-Bis (1H-pyrazol-1-yl) pyrimidine and Related Compounds on HCl-Ethanol-Induced Gastric Lesions in Rats // Chemical and pharmaceutical bulletin. – 1997. – Т. 45. – №. 3. – P. 549-551.
3. U.S. Patent № 4849424 (A), МПК: A61K31/50, A61K31/505, A61P1/04. Pyrimidine derivatives: № 19870082056: filed. 05.08.1987 : patented 18.07.1989 / Ikeda Masazumi – 8 p.

4. Hussain S. M. Reactions with 2-mercaptopyrimidines. Synthesis of some new thiazolo [3, 2-a]-and triazolo [4, 3-a] pyrimidines // *Journal of heterocyclic chemistry*. – 1987. – Т. 24. – №. 6. – P. 1605-1610.
5. Kapadia G. J. et al. Cancer chemopreventive activity of synthetic colorants used in foods, pharmaceuticals and cosmetic preparations // *Cancer letters*. – 1998. – Т. 129. – №. 1. – P. 87-95.
6. Mert S. et al. Novel pyrazole-3, 4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors // *Arabian Journal of Chemistry*. 2019. Т. 12. №. 8. – P. 2740-2748.
7. Nasr T., Bondock S., Eid S. Design, synthesis, antimicrobial evaluation and molecular docking studies of some new thiophene, pyrazole and pyridone derivatives bearing sulfisoxazole moiety // *European journal of medicinal chemistry*. – 2014. – Т. 84. – P. 491-504.
8. Зубов И., Бобров П., Агеев Я., Нижибовская Д., Субоч Г. Циклоконденсация 2-гидроксиимино-1,3-дифенилпропан-1,3 диона с 2-гидразинилбензотиазолом. Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 ч. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. Т. 1. С. 642-643.
9. Нижибовская, Д., Агеев Я., Бобров П. Циклоконденсация 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксиимино-1,3-дикетонами. Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всерос. Науч.-практ. конф. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. Т. 1. С. 466-468.
10. Нижибовская Д., Агеев Я., Бобров П. Циклоконденсация 2-гидразинилхиноксалина с 2-гидроксиимино-1,3-дикетонами. Сборник Всероссийской конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» : сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. Т. 1. С. 463-466.

#### References

1. U.S. Patent № 3040047, МПК: C07D239/42, C07D239/46, C07D239/48. 2-(Pyrazol-1-yl)-pyrimidine derivatives: № 19600019448 : filed. 04.04.1960 : patented 19.06.1962 / Kenzo Sirakawa– 7 p.
2. Ikeda M. et al. Cytoprotective Effects of 4, 6-Bis (1H-pyrazol-1-yl) pyrimidine and Related Compounds on HCl· Ethanol-Induced Gastric Lesions in Rats // *Chemical and pharmaceutical bulletin*. 1997. Т. 45. №. 3. P. 549-551.
3. U.S. Patent № 4849424 (A), МПК: A61K31/50, A61K31/505, A61P1/04. Pyrimidine derivatives: № 19870082056: filed. 05.08.1987 : patented 18.07.1989 / Ikeda Masazumi – 8 p.
4. Hussain S. M. Reactions with 2-mercaptopyrimidines. Synthesis of some new thiazolo [3, 2-a]-and triazolo [4, 3-a] pyrimidines // *Journal of heterocyclic chemistry*. 1987. Т. 24. №. 6. P. 1605-1610.
5. Kapadia G. J. et al. Cancer chemopreventive activity of synthetic colorants used in foods, pharmaceuticals and cosmetic preparations // *Cancer letters*. – 1998. Т. 129. №. 1. P. 87-95.
6. Mert S. et al. Novel pyrazole-3, 4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors // *Arabian Journal of Chemistry*. 2019. Т. 12. №. 8. P. 2740-2748.
7. Nasr T., Bondock S., Eid S. Design, synthesis, antimicrobial evaluation and molecular docking studies of some new thiophene, pyrazole and pyridone derivatives bearing sulfisoxazole moiety // *European journal of medicinal chemistry*. – 2014. – Т. 84. – P. 491-504.
8. Zubov I., Bobrov P., Ageev Ya., Nizhibovskaya D., Suboch G. Cyclocondensation of 2-hydroxyimino-1,3-diphenylpropane-1,3 dione with 2-hydrazinylbenzothiazole. Reshetnev readings: materials of the XXV International Scientific and Practical Conference, dedicated. In memory of the General designer of rocket and space systems, Academician M. F. Reshetnev: at 2 o'clock - Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. Vol. 1. pp. 642-643.
9. Nizhibovskaya, D., Ageev Ya., Bobrov P. Cyclocondensation of 2-hydrazinylpyrimidine with 2-hydroxyimino-1,3-diketones. Young scientists in solving urgent problems of science : a collection of materials by Vseros. Scientific and practical conference – Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. Vol. 1. pp. 466-468.
10. Nizhibovskaya D., Ageev Ya., Bobrov P. Cyclocondensation of 2-hydrazinylquinoxaline with 2-hydroxyimino-1,3-diketones. Collection of the All-Russian conference "Forest and chemical complexes – problems and solutions" : collection of materials based on the results of the All-Russian Scientific and Practical Conference – Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. V. 1. P. 463-466.

УДК 547.773 + 547.853

## СИНТЕЗ ПИРИМИДИЛЗАМЕЩЁННОГО 3-МЕТОКСИМЕТИЛ-5-( $\gamma$ -ПИРИДИНИЛ)-4-НИТРОЗОПИРАЗОЛА

Д. К. Нижибовская\*, Я. И. Агеев, П. С. Бобров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: nig\_dasha@mail.ru

*Циклоконденсацией замещенного 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-( $\gamma$ -пиридинил)пропан-1,3-дионом впервые синтезирован 3-метоксиметил-5-( $\gamma$ -пиридинил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол. Строение полученного соединения подтверждено методом электронной спектроскопии.*

*Ключевые слова: циклоконденсация, пиразол, пиримидин, нитрозопиразол, электронная спектроскопия.*

## SYNTHESIS OF PYRIMIDYL SUBSTITUTED 3-METHOXYMETHYL-5-( $\gamma$ -PYRIDINYL)4-NITROSOPYRAZOLE

D. K. Nizhibovskaya\*, Y. I. Ageev, P. S. Bobrov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: nig\_dasha@mail.ru

*This article describes cyclocondensation of 2-hydrazinylpyrimidine with 2-hydroxymino-3-methoxymethyl-1-( $\gamma$ -pyridinyl)propane-1,3-dione. A previously unknown 3-methoxymethyl-5-( $\gamma$ -pyridinyl)-4-nitroso-1-(4,6-dimethylpyrimidine-2-yl)pyrazole was obtained for the first time. The UV/Vis spectrum confirms the structure of a previously unknown compound.*

*Keywords: cyclocondensation, pyrazole, pyrimidine, nitrosopyrazole, electron spectroscopy.*

Пиримидилпиразолы – обширный класс гетероциклических соединений, который обладает широким спектром полезных свойств, таких как противотуберкулезная [1], цитопротективная [2], противовоспалительная [3], противорактогенная [4] и другая биологическая активность.

Также известны 4-азопиразолы, обладающие противоопухолевой активностью [5], и 4-ацетамидопиразолы – с антиглаукомной [6] и противогрибковой активностью [7]. Самым доступным способом получения данных биологически активных веществ является модификация нитрозогруппы, находящейся в 4-ом положении пиразольного цикла.

На кафедре ОХТ уже были изучены и проведены некоторые реакции циклоконденсации гетарил-гидразинов с изонитрозодикетонами с образованием соответствующих N-гетарил-4-нитрозопиразолов. Так, в качестве гетарильного фрагмента выступали бензотиазол, пиримидин, хинаксалин и хиназолин [8-11]. Однако, до сих пор не была изучена циклоароматизация 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-( $\gamma$ -пиридинил)пропан-1,3-дионом, в результате которой может быть получен неизвестный ранее 3-метоксиметил-5-( $\gamma$ -пиридинил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол.

Поэтому целью настоящей работы стало изучение данной циклоконденсации (рис. 1), а также подтверждение строения продукта реакции.

Для синтеза пиримидилзамещенного 4-нитрозопиразола были получены 2-гидразинил-4,6-диметилпиримидин и 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-( $\gamma$ -пиридинил)пропан-1,3-дионом по известным методикам.

Синтез целевого продукта осуществляли в среде уксусной кислоты, при этом раствор со временем переходил от светло-зеленого до зелено-коричневого цвета. Схема синтеза изображена на рис. 1.

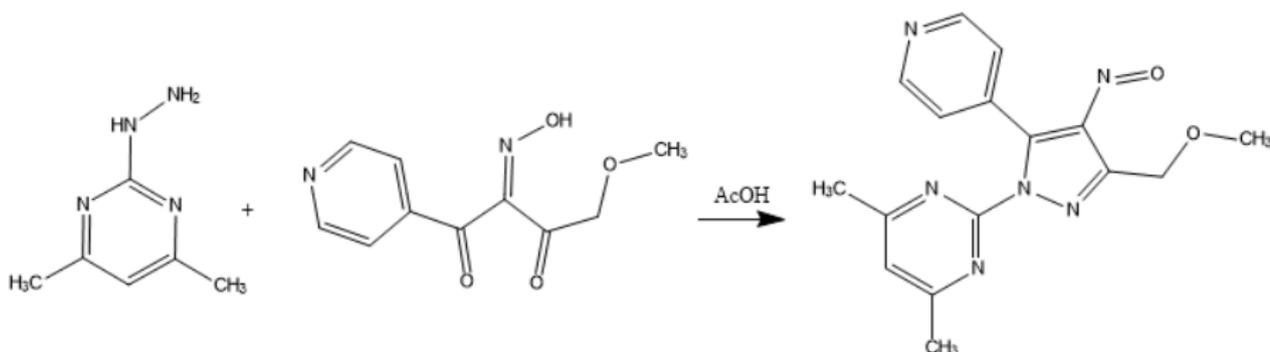


Рис.1. Синтез 3-метоксиметил-5-(γ-пиридинил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразола

После колоночной хроматографии продукт был перекристаллизован из четыреххлористого углерода с получением зеленых кристаллов, растворимых в ацетонитриле, толуоле и хлороформе. Строение впервые синтезированного соединения подтверждено методом электронной спектроскопии (рис. 2).

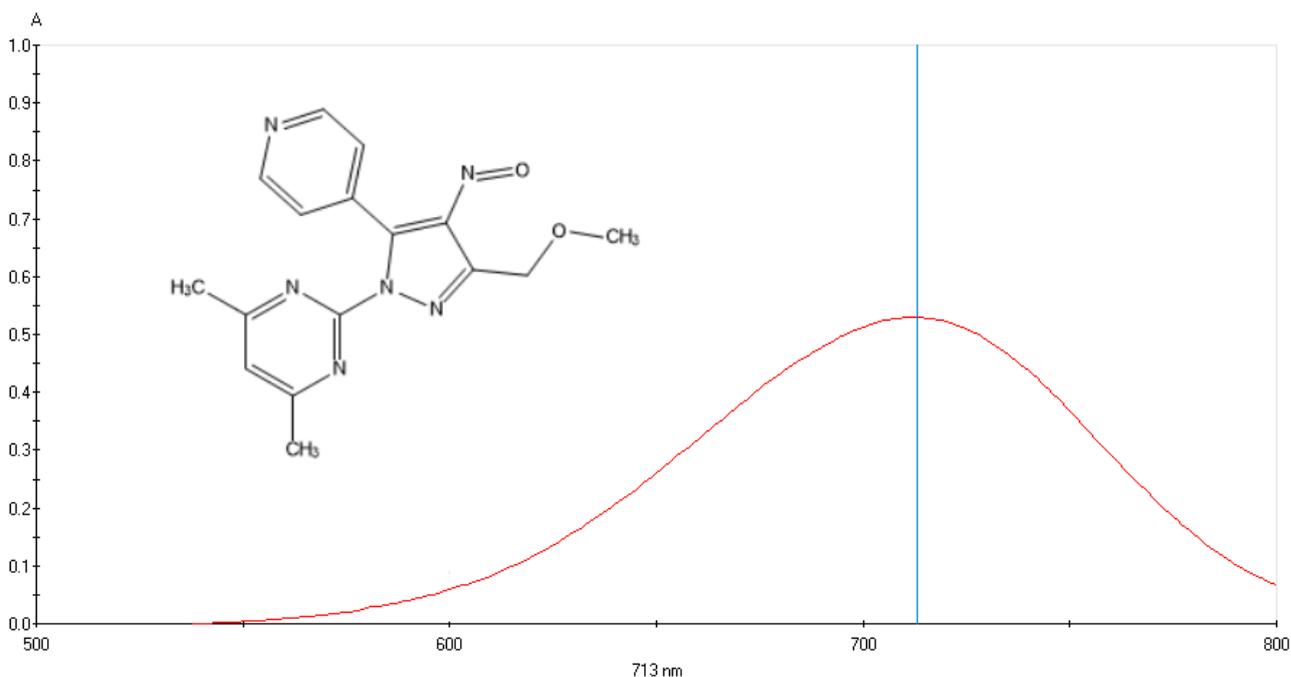


Рис. 2. Электронный спектр  
3-метоксиметил-5-(γ-пиридинил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразола

На электронном спектре соединения присутствует максимум поглощения нитрозогруппы в видимой области, обусловленный  $n \rightarrow \pi^*$  переходом неподелённой электронной пары атома азота нитрозогруппы.

#### Экспериментальная часть.

##### 3-Метоксиметил-5-(γ-пиридинил)-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол

В колбу загружали при перемешивании 2-гидроксимино-3-метоксиметил-1-(γ-пиридинил)пропан-1,3-дион (0,14 г, 0,73 ммоль), 2-гидразинил-4,6-диметилпиримидин (0,101 г, 0,73 ммоль) и 6 мл уксусной кислоты порционно, затем кипятили при перемешивании в течении 35 мин. По окончании ре-

акции раствор темно-зеленого цвета охлаждали, выливали в воду. Высаливали при помощи хлорида натрия, после чего экстрагировали хлороформом (10 мл × 2). Объединённые экстракты промывали 5%-ным раствором соды, затем насыщенным раствором хлорида натрия и сушили над прокаленным сульфатом натрия. Продукт очищали при помощи колоночной хроматографии (элюент – толуол: ацетонитрил = 25: 1). Выход 0,097 г (45%), зеленые кристаллы, Т. пл.= 174-176°C. Электронный спектр (CHCl<sub>3</sub>), λ<sub>(max)</sub>, нм (ε): 713(53).

### Библиографические ссылки

1. U.S. Patent № 3040047, МПК: C07D239/42, C07D239/46, C07D239/48. 2-(Pyrazol-1-yl)-pyrimidine derivatives: № 19600019448 : filed. 04.04.1960 : patented 19.06.1962 / Kenzo Sirakawa– 7 p.
2. Ikeda M. et al. Cytoprotective Effects of 4, 6-Bis (1H-pyrazol-1-yl) pyrimidine and Related Compounds on HCl· Ethanol-Induced Gastric Lesions in Rats // Chemical and pharmaceutical bulletin. – 1997. – Т. 45. – №. 3. – P. 549-551.
3. U.S. Patent № 4849424 (A), МПК: A61K31/50, A61K31/505, A61P1/04. Pyrimidine derivatives: № 19870082056: filed. 05.08.1987 : patented 18.07.1989 / Ikeda Masazumi – 8 p.
4. Hussain S. M. Reactions with 2-mercaptopyrimidines. Synthesis of some new thiazolo [3, 2-a]-and triazolo [4, 3-a] pyrimidines // Journal of heterocyclic chemistry. – 1987. – Т. 24. – №. 6. – P. 1605-1610.
5. Kapadia G. J. et al. Cancer chemopreventive activity of synthetic colorants used in foods, pharmaceuticals and cosmetic preparations // Cancer letters. – 1998. – Т. 129. – №. 1. – P. 87-95.
6. Mert S. et al. Novel pyrazole-3, 4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors // Arabian Journal of Chemistry. – 2019. – Т. 12. – №. 8. – P. 2740-2748.
7. Nasr T., Bondock S., Eid S. Design, synthesis, antimicrobial evaluation and molecular docking studies of some new thiophene, pyrazole and pyridone derivatives bearing sulfisoxazole moiety // European journal of medicinal chemistry. – 2014. – Т. 84. – P. 491-504.
8. Зубов И., Бобров П., Агеев Я., Нижибовская Д., Субоч Г. Циклоконденсация 2-гидроксиимино-1,3-дифенилпропан-1,3 диона с 2-гидразинилбензотиазолом. Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 ч. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. Т. 1. С. 642-643.
9. Нижибовская Д., Агеев Я., Бобров П. Циклоконденсация 2-гидразинилпириимидина с 2-гидроксиимино-1,3-дикетонами. Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всерос. Науч.-практ. конф. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. Т. 1. С. 466-468.
10. Нижибовская Д., Агеев Я., Бобров П. Циклоконденсация 2-гидразинилхиноксалина с 2-гидроксиимино-1,3-дикетонами. Сборник Всероссийской конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» : сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. Т. 1. С. 463-466.
11. Агеев Я., Нижибовская Д., Бобров П. Циклоконденсация 4-гидразинилхиназолина с 2-гидроксиимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом. Решетневские чтения: материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 ч. – Красноярск, Издательство СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. Т. 1. – С. 706-708.

### References

1. U.S. Patent № 3040047, МПК: C07D239/42, C07D239/46, C07D239/48. 2-(Pyrazol-1-yl)-pyrimidine derivatives: № 19600019448 : filed. 04.04.1960 : patented 19.06.1962 / Kenzo Sirakawa– 7 p.
2. Ikeda M. et al. Cytoprotective Effects of 4, 6-Bis (1H-pyrazol-1-yl) pyrimidine and Related Compounds on HCl· Ethanol-Induced Gastric Lesions in Rats // Chemical and pharmaceutical bulletin. – 1997. – Т. 45. – №. 3. – P. 549-551.
3. U.S. Patent № 4849424 (A), МПК: A61K31/50, A61K31/505, A61P1/04. Pyrimidine derivatives: № 19870082056: filed. 05.08.1987 : patented 18.07.1989 / Ikeda Masazumi – 8 p.
4. Hussain S. M. Reactions with 2-mercaptopyrimidines. Synthesis of some new thiazolo [3, 2-a]-and triazolo [4, 3-a] pyrimidines // Journal of heterocyclic chemistry. – 1987. – Т. 24. – №. 6. – P. 1605-1610.

5. Kapadia G. J. et al. Cancer chemopreventive activity of synthetic colorants used in foods, pharmaceuticals and cosmetic preparations // *Cancer letters*. – 1998. – Т. 129. – №. 1. – P. 87-95.
6. Mert S. et al. Novel pyrazole-3, 4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2019. – Т. 12. – №. 8. – P. 2740-2748.
7. Nasr T., Bondock S., Eid S. Design, synthesis, antimicrobial evaluation and molecular docking studies of some new thiophene, pyrazole and pyridone derivatives bearing sulfisoxazole moiety // *European journal of medicinal chemistry*. – 2014. – Т. 84. – P. 491-504.
8. Zubov I., Bobrov P., Ageev Ya., Nizhibovskaya D., Suboch G. Cyclocondensation of 2-hydroxyimino-1,3-diphenylpropane-1,3 dione with 2-hydrazinylbenzothiazole. Reshetnev readings: materials of the XXV International Scientific and Practical Conference, dedicated. In memory of the general designer of rocket and space systems Academician M. F. Reshetnev: at 2 o'clock – Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2021. Vol. 1. pp. 642-643.
9. Nizhibovskaya D., Ageev Ya., Bobrov P. Cyclocondensation of 2-hydrazinylpyrimidine with 2-hydroxyimino-1,3-diketones. Young scientists in solving urgent problems of science : a collection of materials by Vseros. Scientific and practical conference – Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. Vol. 1. pp. 466-468.
10. Nizhibovskaya D., Ageev Ya., Bobrov P. Cyclocondensation of 2-hydrazinylquinoxaline with 2-hydroxyimino-1,3-diketones. Collection of the All-Russian conference "Forest and chemical complexes – problems and solutions" : collection of materials based on the results of the All-Russian Scientific and Practical Conference – Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. Vol. 1. pp. 463-466.
11. Ageev Ya., Nizhibovskaya D., Bobrov P. Cyclocondensation 4-hydrazinylquinazoline with 2-hydroxyimino-1,3-diphenylpropane-1,3-dione. Reshetnev readings: materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference, dedicated. In memory of the General designer of rocket and space systems academician M. F. Reshetnev: at 2 o'clock – Krasnoyarsk, Publishing House of SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. Vol. 1. – pp. 706-708.

© Нижибовская Д. К., Агеев Я. И., Бобров П. С., 2023

УДК 547.773

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЦИКЛОКОНДЕНСАЦИИ ДИГИДРАЛАЗИНА С ИЗОНИТРОЗОБЕНЗОИЛАЦЕТОНОМ

Д. А. Ольчев\*, П. С. Бобров, Г. А. Субоч

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: olchevda@mail.ru

*Показана возможность циклоконденсации 1,4-дигидразинилфталазина с 2-гидроксимино-1,3-дикарбонильными соединениями, в результате которой образуется ранее неизвестный гетарилнитропиразол. Установлено, что наибольший выход нитрозосоединения может быть достигнут при 70 °С и времени реакции 5ч.*

*Ключевые слова: циклоконденсация, пиразол, фталазин, нитропиразол, электронная спектроскопия.*

## DIHYDRALAZINE WITH ISONITROSOBENZOYLACETONE CYCLOCONDENSATION

D. A. Olchev\*, P. S. Bobrov, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: olchevda@mail.ru

*We showed the possibility of cyclocondensation of 1,4-dihydrazinylphthalazine with 2-hydroxymino-1,3-dicarbonyl compounds. Cyclocondensation leads to the previously unknown hetaryl nitrosopyrazole. It was found that the highest yield of nitroso compound can be achieved at 70 °C and the best reaction time is 5 hours.*

*Keywords: cyclocondensation, pyrazole, phthalazine, nitrosopyrazole, UV-Vis spectroscopy.*

Дигидралазин (1,4-дигидразинилфталазин) нашёл широкое применение в качестве антигипертензивного лекарственного препарата. Вместе с тем, повышенной биологической активностью обладают циклические аналоги дигидралазина, образующиеся при его циклоконденсации с ацетилацетоном и другими диэлектрофилами.

До сих пор не была исследована циклоконденсация 1,4-дигидразинилфталазина с 2-гидроксимино-1,3-дикетонами, которая может позволить синтезировать ранее неизвестные нитропиразолилфталазины, содержащие в своей структуре по два нитропиразольных остатка. Наличие нитрогруппы в молекуле пиразолилфталазина открывает возможности перехода к широкому кругу других азотсодержащих функциональных групп, в том числе фармакофорных [1]. Вместе с тем, динитрозосоединения проявляют свойства низкотемпературных вулканизирующих и модифицирующих агентов в полимерных композициях.

Поэтому, целью данной работы стало изучение условий циклоконденсации дигидразинилфталазина с изонитрозобензоилацетоном.

Ранее нами было показано, что гетарилгидразины успешно вступают в циклоконденсацию с изонитрозодикетонами в уксусной кислоте с образованием 1-гетарил-4-нитропиразолов [2-3], а использование других растворителей, таких как ДМСО, толуола, пиридина или этанола приводит к снижению выходов желаемых продуктов. По этой причине, в данном исследовании в качестве растворителя для исследования циклоконденсации использована ледяная уксусная кислота.

Сравнение эффективности выбранных условий для синтеза целевого фталазинилнитропиразола проводили с помощью спектрофотометрического метода, сравнивая оптическую плотность раствора

в области максимума поглощения нитрозогруппы (704 нм). Для этого проводили серию экспериментов, варьируя мольным соотношением 1,4-дигидразинилфталазина к 2-гидроксимино-1-фенилбутандиону-1,3, а также температурой и временем реакции. Все эксперименты выполнены в масштабе 0,1 ммоль 1,4-дигидразинилфталазина (1 экв.) в 2 мл уксусной кислоты. Электронные спектры записаны на спектрофотометре HELIOS OMEGA в кварцевых кюветах 1 см в области 400–800 нм.

Серия экспериментов, проведённых при кипячении в уксусной кислоте в течение 1 ч, показала, что наибольший выход нитрозопиразола может быть достигнут при использовании 4 эквивалентов изонитрозодикетона на 1 эквивалент дигидралазина ( $A=2,190$ ). Использование меньших количеств изонитрозодикетона приводит к снижению оптической плотности раствора в исследуемой области, а так же к осмолению реакционной массы. Увеличение количества изонитрозодикетона до 5 эквивалентов не приводит к дальнейшему повышению выхода продукта, а использование 8 эквивалентов приводит к незначительному снижению оптической плотности раствора в области 704 нм. Вместе с тем, сравнение состава реакционной массы методом ТСХ (толуол-ацетонитрил) при различных соотношениях гидразина и дикетона (1:1, 1:2, 1:4, 1:5, 1:8) показало, что во всех случаях образуются идентичные продукты циклоконденсации, предположительно имеющие структуру бис-нитрозопиразол-илфталазина.

Поскольку более длительное кипячение реакционной массы приводит к значительному осмолению продукта, циклоконденсация была исследована и при более низких значениях температуры. Так, при температуре 25 °С обнаружено, что накопление гетарилнитрозопиразола в реакционной массе протекает в течение 96 ч ( $A=2,176$ ), а дальнейшее выдерживание при данной температуре не приводит к снижению оптической плотности раствора, что указывает на возможность минимизации количества продуктов осмоления при снижении температуры реакции.

Установлено, что циклоконденсация при 70 °С в течение 5 ч приводит к незначительному повышению оптической плотности раствора ( $A=2,398$ ), что показано на рис. 1.

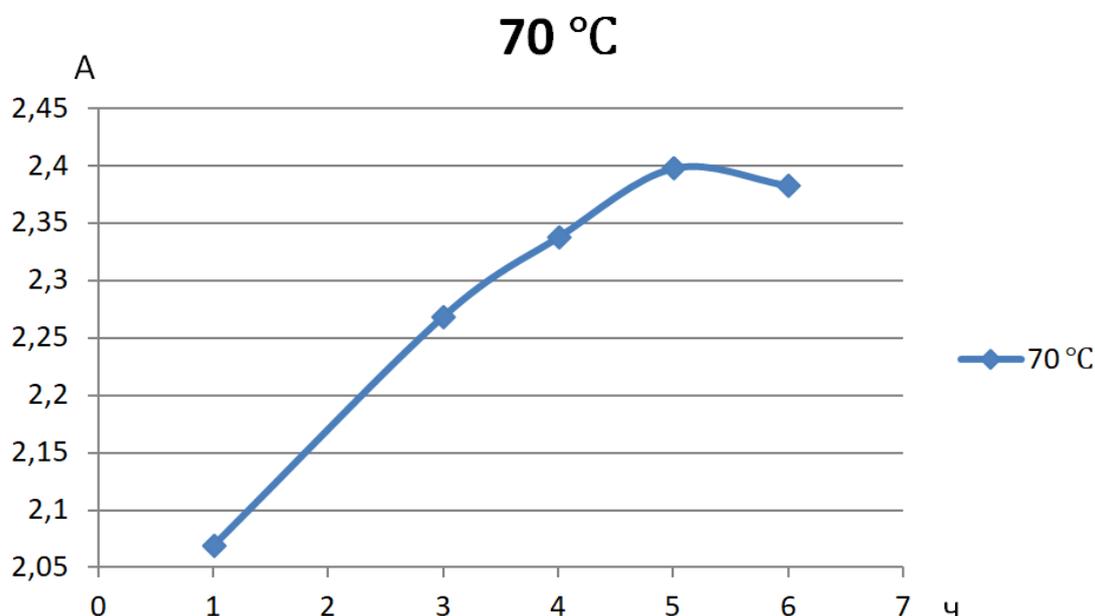


Рис.1. График зависимости оптической плотности раствора  $A$  ( $\lambda = 704$  нм) реакционной массы от времени реакции при температуре 70 °С

Таким образом, в результате проведённых исследований установлено, что наибольший выход 1,4-бис(3-метил-4-нитрозо-5-фенил-1Н-пиразол-1-ил)фталазина может быть достигнут при циклоконденсации 1 эквивалента дигидралазина с 4 эквивалентами изонитрозобензоилацетона в уксусной кислоте при температуре 70 °С и времени реакции 5 ч.

### Библиографические ссылки

1. Бобров П.С., Аненко Д.С., Кодониди И.П., Абисалова И.Л., Сергеева Е.О., Саджая Л.А., Петерсон И.В., Субоч Г.А. Новые производные N-бензотиазолилпиразола с выраженной антиоксидантной активностью // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия. – 2022. – Т. 15. – №4. – С. 496–506.
2. Bobrov P.S., Kirik S.D., Peterson I.V., Suboch G.A. Regioselective Synthesis of Novel Nitrosopyrazolylquinoxalines via HOAc-Mediated Cyclocondensation of 2-Hydroxyimino-1,3-diketones with Hydrazinylquinoxalines // Organic & Biomolecular Chemistry. – 2023. – Vol. 21 – P. 3604-3614.
3. Bobrov P.S., Kondrasenko A.A., Suboch G.A. Synthesis of N-Benzothiazolyl-4-nitrosopyrazoles // Russian Journal of Organic Chemistry. – 2022. – Vol. 58 – P.1637–1640.

### References

1. Bobrov P.S., Anenko D.S., Kodonidi I.P., Abisalova I.L., Sergeeva E.O., Sajaya L.A., Peterson I.V., Suboch G.A. Novel N-Benzothiazolylpyrazole Derivatives with Pronounced Antioxidant Activity // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. – 2022. – Vol. 15. – №4. – P. 496–506.
2. Bobrov P.S., Kirik S.D., Peterson I.V., Suboch G.A. Regioselective Synthesis of Novel Nitrosopyrazolylquinoxalines via HOAc-Mediated Cyclocondensation of 2-Hydroxyimino-1,3-diketones with Hydrazinylquinoxalines // Organic & Biomolecular Chemistry. – 2023. – Vol. 21 – P. 3604-3614.
3. Bobrov P.S., Kondrasenko A.A., Suboch G.A. Synthesis of N-Benzothiazolyl-4-nitrosopyrazoles // Russian Journal of Organic Chemistry. – 2022. – Vol. 58 – P.1637–1640.

© Ольчев Д. А., Бобров П. С., Субоч Г. А., 2023

УДК 547.775

**СИНТЕЗ 1,2-БИС((3,5-ДИМЕТИЛ-4-НИТРОЗО-1Н-ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)МЕТИЛ)БЕНЗОЛА**

Т. В. Полиенко\*, К. Ю. Кучина, А. В. Боброва, Е. В. Роот

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: polienkot27@mail.ru

*Показана реакция N-алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилолом в двух типах условий. Строение полученного 1,2-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразол-1-ил)метил)бензола подтверждено методами УФ и ЯМР спектроскопии.*

*Ключевые слова: 4-нитрозопиразол, алкилирование,  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилол, суперосновная среда.*

**SYNTHESIS OF 1,2-BIS((3,5-DIMETHYL-4-NITROSO-1H-PYRAZOLE-1-YL)METHYL)BENZENE**

T. V. Polienko\*, K. Yu. Kuchina, A. V. Bobrova, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: polienkot27@mail.ru

*N-alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitrosopyrazole with  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -dibromo-o-xylene under two types of conditions is shown. The structure of the resulting 1,2-bis((3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazol-1-yl)methyl)benzene was confirmed by UV and NMR spectroscopy.*

*Keywords: 4-nitrosopyrazole, alkylation,  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -dibromo-o-xylene, superbasic system.*

Бис-пиразольные системы являются эффективными хелатирующими лигандами, соединения на их основе находят широкое применение в фармацевтической, сельскохозяйственной и химической отраслях [1]. Поэтому представляет интерес построение новых линкерных систем бис-пиразольного ядра. Ранее на кафедре ОХТ СибГУ им. ак. М.Ф. Решетнёва было показано, что использование в качестве алкилирующих агентов дигалогенпроизводных при прямом N-алкилировании 4-нитрозопиразолов открывает возможность синтеза азотфункционализированных бис-пиразольных систем [2-4]. Представляло интерес продолжить построение бис-(4-нитрозопиразольных) систем с использованием линкеров на основе ксилолов. Целью данной работы является построение бис-пиразольной системы по реакции алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозопиразола  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилолом в двух типах условий. Для этого был синтезирован  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилол при взаимодействии о-ксилола с бромом на свету по методике [5]. На следующем этапе  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилол вводили в реакцию алкилирования (рис. 1).

*Алкилирование натриевой соли 3,5-диметил-4-нитрозопиразола  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилолом в ацетоне (рис. 1).* В смесь 0,24 г (1,6 ммоль) натриевой соли 3,5-диметил-4-нитрозопиразола и 7 мл ацетона вводили 0,21 г (0,8 ммоль)  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилола. Реакционную массу кипятили на водяной бане в течение 3,5 часов. Затем смесь упаривали, продукт выделяли методом колоночной хроматографии (гексан, этилацетат: 50:10-50:20). Голубые кристаллы 1,2-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразол-1-ил)метил)бензола были выделены с выходом 21%.

*Алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозопиразола  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилолом в суперосновной среде (рис. 1).* 0,2 г (1,6 ммоль) 3,5-диметил-4-нитрозопиразола растворяли в 20 мл ДМСО, вводили 0,12 г (2,08 ммоль) измельчённого КОН. Выдерживали смесь в течение 1 часа при температуре 75-80°C при перемешивании. Затем смесь охлаждали до комнатной температуры и вводили 0,21 г (0,8 ммоль)  $\alpha$ ,  $\alpha'$ -дибром-о-ксилола и перемешивали 5 часов при комнатной температуре. После реакцию массу

разбавляли и экстрагировали хлороформом (10-15 мл × 9), объединённые экстракты концентрировали в вакууме. Выделение продукта проводили на хроматографической колонке с силикагелем. В качестве элюента использовали смесь гексана и этилацетата (50:10-50:20). Выход голубых кристаллов 1,2-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензола составил 6%.

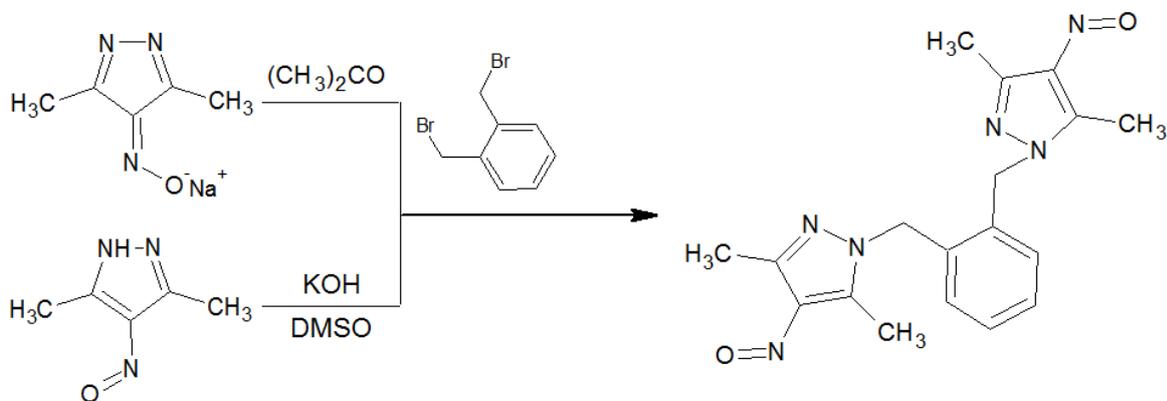


Рис. 1. Схема алкилирования 3,5-диметил-4-нитропиразола  $\alpha, \alpha'$ -дибром-о-ксилолом

1,2-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензол, голубые кристаллы.  $T_{пл}$ =156-157°C. УФ спектр,  $\epsilon$ : 100 (678 нм). Спектр ЯМР  $^1H$ ,  $\delta$ , м. д.: 7,35-7,02 (м, 4H, Ar), 5,49 (с, 2H, CH<sub>2</sub>), 2,88 (уш. с, 2H, CH<sub>2</sub>), 2,30 (уш. с, 3H, CH<sub>3</sub>). Спектр ЯМР  $^{13}C$ ,  $\delta$ , м. д.: 160.43, 133.3, 129.0, 50.7, 13.1, 10.0.

Таким образом, в результате реакции N-алкилирования 3,5-диметил-4-нитропиразола и его соли  $\alpha, \alpha'$ -дибром-о-ксилолом в двух типах условий, получена ранее неизвестная азотфункционализованная бис-пиразольная система. Строение 1,2-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензола подтверждено с помощью УФ, ЯМР  $^1H$  и ЯМР  $^{13}C$  спектроскопии.

### Библиографические ссылки

1. Потапов А. С. Синтез и некоторые свойства бис(пиразол-1-ил)метанов и хелатообразующих олигомеров на их основе : специальности 02.00.03 «Органическая химия»; 02.00.06 «Высокомолекулярные соединения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук / Потапов Андрей Сергеевич ; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2006. – 20 с. : ил. – Библиогр.: с. 18–20. – Место защиты: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Текст : непосредственный.

2. N-алкилирование 3,5-диметил-4-нитропиразола / А.Д. Раджабов, И.С. Пономарев, Е.В. Роот // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник статей студентов и молодых ученых. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2019, 450-451 с.

3. Алкилирование и ацилирование 4-нитрозо-1Н-пиразолов / А.В. Боброва, А.Н. Поздеева, Э. Ш. Кулиева, Е.В. Роот // Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера. В 2 томах. Том 1 (г. Томск, 16–19 мая 2022 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. 472 с.

4. Получение 1,4-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензола / Т.В. Полюенко, К.Ю. Кучина, А.В. Боброва // Решетнёвские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвящ. Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–11 ноября 2022, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова, СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. С. 748-750.

5. Хиккинботтом В., Реакции органических соединений. ГОНТИ, 1939, 72 с.

### References

1. Potapov AS Synthesis and some properties of bis(pyrazol-1-yl)methanes and chelate-forming oligomers based on them: specialty 02.00.03 "Organic Chemistry"; 02.00.06 "High-molecular compounds": abstract of the dissertation for the degree of candidate of chemical sciences / Potapov Andrey Sergeevich; Altai State Technical University I.I. Polzunov. – Barnaul, 2006. – 20 p. : ill. – Bibliography: p. 18–20. – Place of protection: Altai State Technical University named after. I.I. Polzunova. – – direct text.
2. N-alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitrosopyrazol / A. D. Radzhabov, I. S. Ponomarev, E. V. Root // Young scientists in solving urgent problems of science. All-Russian scientific and practical conference. Collection of articles by students and young scientists. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2019, 450-451 p.
3. Alkylation and acylation of 4-nitroso-1H-pyrazoles / A.V. Bobrova, A.N. Pozdeyeva, E.Sh. Kulieva, E.V. Root // Chemistry and chemical technology in the XXI century : materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference of Students and Young scientists named after outstanding chemists L.P. Kulev and N.M. Kizhner. In 2 volumes. Volume 1 (Tomsk, May 16-19, 2022) / Tomsk Polytechnic University. Tomsk : Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2022. 472 p.
4. Preparation of 1,4-bis((3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazol-1-yl)methyl)benzene / T.V. Polienko, K.Yu. Kuchina, A.V. Bobrova // Reshetnev readings: materials of the XXVI International scientific and practical conference, dedicated to. In memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev (November 9–11, 2022, Krasnoyarsk): in 2 hours / under the general. ed. Yu. Yu. Loginova, Siberian State University. M. F. Reshetneva, 2022. S. 748-750.
5. Hickinbottom V., Reactions of organic compounds. GONTI, 1939, 72 p.

© Полиенко Т. В., Кучина К. Ю., Боброва А. В., Рот Е. В., 2023

УДК 542.816

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ДЛЯ ОЧИСТКИ РАСТВОРОВ

Н. С. Поляк, М. В. Чижевская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nikiforovanatala732@gmail.com

*Внимание в статье уделено практическому применению методов мембранного электролиза в качестве метода очистки растворов от нежелательных примесей.*

*Ключевые слова: мембранные технологии, электролиз, очистка, электродиализ.*

## APPLICATION OF MEMBRANE ELECTROLYSIS FOR CLEANING SOLUTIONS

N. S. Polyak, M. V. Chizhevskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nikiforovanatala732@gmail.com

*Attention in the article is paid to membrane methods of cleaning solutions, namely membrane electrolysis.*

*Keywords: membrane technologies, electrolysis, purification, electrodiagnosis.*

Впервые электрокинетические явления электрофореза и электроосмоса описал в 1809 году Ф.Ф. Рейсс. Эти процессы протекают при воздействии постоянного электрического тока через дисперсионную среду. Дисперсная фаза несет в себе заряд, противоположный по знаку заряду дисперсионной среды. Движение частиц дисперсионной фазы к одному из электродов при пропускании через коллоидный электролит постоянного электрического тока называется электрофорезом, а движение частиц дисперсионной среды – электроосмос [1].

Различные электрохимические методы применяют в очистке сточных вод и водоподготовке. Например, при электрофлотации удаление твердых взвешенных частиц, волокон, шлама, нефтепродуктов достигается за счет выведения их на поверхность из объема фазы пузырьками газа, выделяющимися при электролизе очищаемого раствора. При электрокоагуляции используют аноды из алюминия или железа, при их растворении образуются гидроксиды, адсорбирующие ионы раствора и выпадающие затем в осадок. Электродеструкция основана на электрохимических превращениях органических соединений на электродах с образованием нетоксичных веществ. При электродиализе катод располагают за катионитовой диафрагмой, а анод – за анионитовой. В результате при пропускании электрического тока из средней части раствора катионы уходят к катоду, а анионы – к аноду, что приводит к обессоливанию раствора, а в определенных условиях также и к удалению из него коллоидных частиц [2].

Мембранные методы используют для разделения веществ: диализ, основанный на разности концентраций вещества на границах мембраны, и электродиализ, использующий разность электрических потенциалов по обе стороны мембраны.

Диализ применяют для удаления кислот или оснований из загрязненных вод. Поскольку молекулярная диффузия электролита – медленный процесс, то для ее ускорения была использована взаимодиффузия катионов в катионообменной или анионов в анионообменной мембранах. Противоположно направленные потоки катионов кальция и натрия (взаимодиффузия) через катионообменную мембрану не тормозятся потоками анионов, которые остаются при взаимодиффузии на месте (доннановский

диализ). Доннановский диализ находит применение для удаления из разбавленных сточных и производственных растворов ртути, свинца, цинка, меди, серебра, никеля, кадмия, хрома.

Электродиализ – это процесс переноса ионов через мембрану под действием электрического поля, приложенного к мембране. Скорость переноса ионов может изменяться подбором соответствующей силы тока. Такой перенос может осуществляться против градиента концентрации. Наложение электрического поля приводит к трудностям, связанным с реакциями на электродах, то есть с образованием щелочи около катода и кислоты у анода. В присутствии хлоридов на аноде образуется также хлор. В связи с этим должны быть предприняты специальные меры для удаления из аппарата жидкости, содержащей эти вещества. В некоторых случаях растворы из электродных камер могут вновь возвращаться в процесс (с контролем pH или без него) [3].

Электромембранные процессы принадлежат к процессам жидкофазного разделения. За счет собственных межионных взаимодействий может возникать движущая сила ионного разделения, намного превышающая ту же величину, обусловленную одним только концентрационным градиентом. Однако выделение ионов, превышающее равновесную концентрацию, невозможно. Более того, возникающий ионный поток обычно слишком мал для его промышленного использования. Эти ограничения можно преодолеть под действием внешнего электрического потенциала. Применяя достаточный набор мембран и соответствующий высокий электрический потенциал, можно удалить из раствора даже следы ионов. Ионный поток в этом случае обусловлен главным образом электрическим переносом. Поэтому под действием электрического тока через мембрану можно достичь, в определенных пределах, довольно высоких потоков. Сейчас можно выделить четыре основные области применения мембран:

- 1) процессы разделения веществ: микрофильтрация, ультрафильтрация, обратный осмос, газоразделение, диализ и электродиализ;
- 2) контролируемые системы массопереноса для дозированного введения лекарств или внесения в почву удобрений и пестицидов;
- 3) мембранные реакторы: ферментные и каталитические, биосенсорные устройства – и ткани искусственных органов;
- 4) мембраны в энергосберегающих и конверсионных системах: в топливных элементах и электролизерах[3].

Практическое применение мембранных процессов многогранно. Например, для опреснения воды с начальным содержанием солей 3–10 г/л применение электродиализа является экономически более выгодным. Основным методом деионизации воды, имеющей применение в медицине и микроэлектронике, является электродиализ. Во многих отраслях химической и биохимической промышленности применяют электродиализное концентрирование. Для концентрирования электролитов применяются как аппараты с конструкцией, аналогичной электродиализаторам-опреснителям (с проточными камерами концентрирования), так и с непроточными камерами концентрирования, имеющими только одно отверстие для выхода концентрата. Биполярные мембраны используют в методе биполярного электродиализа для получения высокочистых концентрированных растворов кислот и щелочей как конечного коммерческого продукта – производство сравнительно дорогое: для этого требуются либо высококачественные, но дорогие биполярные мембраны японского или американского производства, либо повышенные энергозатраты при использовании более дешевых российских мембран. В настоящее время электродиализ широко применяется в различных областях, связанных с разделением и очисткой жидких и газовых смесей: в гидрометаллургии, в гальванических производствах, в пищевой промышленности, медицине и др. Наиболее эффективно разделение происходит в том случае, когда действие мембран усиливается каким-нибудь дополнительным эффектом. Эффект электромембранного разделения ионов может быть усилен связыванием одного из ионов в комплексный ион или его осаждением в виде малорастворимого электролита. Особый интерес представляет применение процессов электродиализа в системах регенерации воды и воздуха в замкнутых системах и системах жизнеобеспечения [4-5].

#### Библиографические ссылки

1. Коровин Н.В. Общая химия // М.: Высш.школа. 2002.
2. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Электрохимия// М.: Высш.школа. 1987.
3. Ильин С.И. Электромембранные процессы // М.: РХТУ им. Менделеева, 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://membranemsk.ru/Electromembr.pdf> (дата обращения 12.09.2023)

4. Заболоцкий В.И. Развитие электродиализа в России// В.И. Заболоцкий, Н.П. Березина, В.В. Никоненко, В.А. Шапошник, А.А. Цхай/ Сайт «МЕМБРАНЫ информационно-аналитический журнал» URL: [https://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/4/st\\_1/zabo\\_tx1.htm](https://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/4/st_1/zabo_tx1.htm) (дата обращения 12.09.2023).

5. Заболоцкий В.И., Никоненко В.В. Электродиализ разбавленных растворов электролитов: некоторые теоретические и прикладные аспекты // Электрохимия. – 1996. – т. 32, № 2. – с. 246–254.

#### References

1. Korovin N.V. Obshchaya khimiya // М.: Vyssh.shkola. 2002.
2. Damaskin B.B., Petriy O.A. Elektrokhimiya// М.: Vyssh.shkola. 1987.
3. П'ин S.I. Elektromembrannye protsessy // М.: RKhTU im. Mendeleeva, 2013. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://membranemsk.ru/Electromembr.pdf> (data obrashcheniya 12.09.2023)
4. Zabolotskiy V.I. Razvitie elektrodializa v Rossii// V.I. Zabolotskiy, N.P. Berezina, V.V. Nikonenko, V.A. Shaposhnik, A.A. Tskhay/ Sayt «MEMBRANY informatsionno-analiticheskiy zhurnal» URL: [https://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/4/st\\_1/zabo\\_tx1.htm](https://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/4/st_1/zabo_tx1.htm) (data obrashcheniya 12.09.2023).
5. Zabolotskiy V.I., Nikonenko V.V. Elektrodializ razbavlennykh rastvorov elektrolitov: nekotorye teoreticheskie i prikladnye aspekty // Elektrokhimiya. – 1996. – т. 32, № 2. – с. 246–254.

© Поляк Н. С., Чижевская М. В., 2023

УДК 669.058

## ХИМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕДИ НА ДИЭЛЕКТРИКАХ

А. Р. Хафизов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: khaf\_a03@mail.ru

*В работе была исследована такая технология, с помощью которой можно восстанавливать медь на многих диэлектриках, с целью получения электропроводного слоя для дальнейшего нанесения гальванических покрытий.*

*Ключевые слова: химическая металлизация, электропроводное покрытие, гальваника.*

## CHEMICAL REDUCTION OF COPPER ON DIELECTRICS

A. R. Hafizov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: khaf\_a03@mail.ru

*In the work, such a technology was investigated, with the help of which it is possible to restore copper on many dielectrics, in order to obtain an electrically conductive layer for further electroplating.*

*Keywords: chemical metallization, conductive coating, electroplating.*

Гальваническая металлизация – это процесс нанесения металлического слоя на поверхность различных материалов, он основан на электрохимическом осаждении металла под действием электрического тока. Гальванические металлопокрытия диэлектриков получили широкое распространение для защитно-декоративной отделки разнообразных изделий и для технических целей при изготовлении различных машин и приборов. Диэлектрики, на которые нанесены гальванические покрытия, приобретают более эстетичный внешний вид и физико-механические характеристики. Перед нанесением гальванических покрытий поверхности диэлектрика придают электропроводные свойства. Ранее были исследованы различные виды электропроводных покрытий, например, покрытие диэлектрика графитовым, бронзовым лаками. Но химическое восстановление меди на поверхности диэлектрика в качестве электропроводного слоя показало наилучшие результаты. Этот способ нанесения электропроводного слоя имел потенциал к развитию, поэтому было принято решение развивать его.

Проблемы, связанные с восстановлением меди на диэлектриках:

1. На диэлектриках сложно восстанавливать медь, для каждого диэлектрика требуется свой уникальный подход для подготовки поверхности. На большинство диэлектриков вообще нет возможности нанести металл. Поэтому было принято решение наносить такой промежуточный слой поверх диэлектрика, на котором хорошо восстанавливается медь. Также с помощью промежуточного слоя можно будет решить проблему нанесения меди на гигроскопичные и пористые материалы (дерево, кожу, гипс, полиуретан).

2. Существуют различные рецепты растворов для восстановления меди, но многие из них работают некорректно или не дают качественного результата. Поэтому для решения этой проблемы был выбран метод подбора различных рецептов.

Процесс химического восстановления меди происходит в водных растворах за счёт протекания на поверхности изделия определённых химических реакций. Чтобы медь восстанавливалась, проводят активацию поверхности. Активацией называют процесс, в результате которого обрабатываемая поверхность приобретает каталитические свойства, обеспечивающие протекание реакции химического

восстановления металла. Этот процесс заключается в том, что раствор активатора наносят на поверхность диэлектрика после специальной обработки – сенсбилизации [1].

Сенсбилизация – это процесс обработки поверхности диэлектрика раствором восстановителя. В качестве его используется раствор двухлористого олова. Содержащиеся в нём ионы  $\text{Sn}^{+2}$  (в виде  $\text{SnCl}_4^{2-}$ ) сорбируются поверхностью диэлектрика и при последующей промывке подвергаются гидролизу с образованием малорастворимых продуктов. Они прочно закрепляются на обрабатываемой поверхности слоем толщиной от тысячных до нескольких микрон. Готовят растворы сенсбилизации растворением при слабом нагревании 25 грамм двухлористого олова в 25 мл концентрированной соляной кислоте, разбавлением полученного концентрата водой до 0,5 литра (для приготовления предложенных в этой работе растворов следует применять дистиллированную воду) и растворением в нем 110 грамм хлорида натрия [2].

Процесс активирования состоит в получении каталитически активного металла, серебра, в результате взаимодействия активатора с восстановителем, сорбированным поверхностью в растворе сенсбилизации. Полученное серебро равномерно распределяется по всей поверхности в виде коллоидных частиц или малорастворимых соединений. Наличие на поверхности бурой окраски, вызванной осадком крупных частиц серебра (0,005 – 0,01 мкм), свидетельствует о качестве активирования. Приготовление раствора активирования: 1) В 25 мл воды растворить 0,32 г азотнокислого серебра; 2) В другой ёмкости в 20 мл воды растворить 2 г кальцинированной соды; 3) Перемешивая, перелить раствор соды в раствор соли серебра, в результате чего выпадет осадок; 4) Налить в получившийся раствор 5 мл 25% аммиака, перемешать до растворения осадка; 5) Долить воду до отметки 500 мл.

Процесс химического восстановления меди имеет каталитическую природу, т.е. осаждение металла начинается только на активной поверхности катализатора и продолжается автокаталитически уже на меди. Существует много растворов для меднения, состоят они из соли двухвалентной меди, комплексообразователя, восстановителя, стабилизирующих и ускоряющих добавок. Был подобран оптимальный раствор химического восстановления меди, который имеет низкую стоимость, умеренную скорость меднения (для получения электропроводного слоя требуется 10-20 минут нахождения изделия в растворе), который можно использовать многократно (3 раза) и который даёт хорошее качество медного электропроводного слоя (без вздутия поверхности и без её отлипания от изделия).

Рецепт такого раствора на 1 литр: 1) 30 г сульфата меди; 2) 60 г трилона Б; 3) 19 г гидроксида натрия; 4) 5 мл формалина. Для приготовления раствора в воде следует растворять рассчитанные количества компонентов в последовательности, приведённой в рецептуре. Формалин является восстановителем, его следует добавлять перед применением раствора. Раствор без добавления формалина может храниться очень долго. При эксплуатации раствора медь восстанавливается не только на активированной поверхности, но и во всём объёме раствора, но с гораздо меньшей скоростью. Время жизни раствора после добавления формалина составляет 1,5-5 часов. Толщина медного слоя получается около 1 мкм. Себестоимость 1 литра раствора восстановления меди составляет 67 рублей. Известно, что в 1 литре раствора за 1 раз можно покрыть медью поверхности с суммарной площадью более  $0,2 \text{ м}^2$ .

В качестве промежуточного слоя были исследованы акриловые, алкидные, эпоксидные, кислотные аэрозольные грунтовки различных производителей. Оценка промежуточных слоёв проводилась по следующим критериям: 1) Должна быть хорошая адгезия промежуточного слоя к большинству диэлектриков и к восстанавливаемой меди; 2) Слой должен приобретать хорошие каталитические свойства по всей своей поверхности. Эксперименты проводились следующим образом:

1. Оценить получение каталитических свойств поверхностью грунтовки можно визуально по наличию бурой окраски. Если бурой окраски нет или она едва видна, то это свидетельствует о том, что частицы серебра не способны закрепиться на исследуемой грунтовке.

2. Оценить качество адгезии между материалами можно после нанесения гальванического медного покрытия. Если при обработке гравёром с абразивными насадками медное покрытие отколупывается с грунтовки, то это свидетельствует о том, что адгезия между медью и грунтовкой недостаточная.

Для экспериментов в качестве диэлектриков использовались PETG, PLA, ABS пластики, фотополимеры, керамика, дерево. В ходе проведения экспериментов выяснилось, что аэрозольная эпоксидная грунтовка Autor имеет лучшие адгезионные свойства к большинству диэлектриков, но плохие свойства к восстанавливаемой меди. Аэрозольная алкидная грунтовка Kudo имеет недостаточные адгезионные свойства к диэлектрикам, но хорошие адгезионные свойства к эпоксидной грунтовке и восстанавливаемой меди, также эта грунтовка приобретает хорошие каталитические свойства на всей

своей поверхности. Поэтому было принято решение наносить в 2 слоя эпоксидную грунтовку на диэлектрик и поверх неё наносить в 1 слой уже алкидную грунтовку. При правильном нанесении такой промежуточный слой имеет толщину около 0,1 мм. Такой промежуточный слой следует сушить 6 часов при 50 градусов Цельсия, иначе он не приобретает необходимые механические свойства (твёрдость, прочность).

В результате проделанной работы была подобрана универсальная технология, благодаря которой можно восстанавливать медь на многих диэлектриках. Полученный медный слой используется в качестве электропроводного слоя для получения гальванических покрытий.

#### Библиографические ссылки

1. Мелашенко Н. Ф. Гальванические покрытия диэлектриков: справочник. Мн.: Беларусь 1987. С. 44.
2. Активация диэлектрика [Электронный ресурс] // Whoby.Ru радиолюбительские технологии (+). URL: <http://whoby.ru/page/aktivacija-dielektrika> (дата обращения: 28.3.2023).

#### References

1. Melashhenko N. F. *Gal`vanicheskie pokry`tiya die`lektrikov* [Galvanic coatings of dielectrics]. Minsk, Belarus`, 1987, p. 44.
2. *Aktivaciya die`lektrika* [Activation of the dielectric]. (In Russ.). Available at: <http://whoby.ru/page/aktivacija-dielektrika> (accessed 28.3.2023).

© Хафизов А. Р., 2023

УДК 669.058

## СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

А. Р. Хафизов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: khaf\_a03@mail.ru

*В работе было проведено исследование того, как изменяются свойства гальванического медного покрытия при увеличении температуры электролита, а также разработан способ нагрева электролита и поддержания его постоянной температуры.*

*Ключевые слова: гальваника, гальванопластика, медные покрытия, металлизация.*

## WAYS TO IMPROVE ELECTROPLATING

A. R. Hafizov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: khaf\_a03@mail.ru

*In the work, a study was conducted on how the properties of a galvanic copper coating change with an increase in the temperature of the electrolyte, and a method for heating the electrolyte and maintaining its constant temperature was developed.*

*Keywords: electroplating, electroplating, copper coatings, metallization.*

Гальваническая металлизация – это процесс нанесения металлического слоя на поверхность различных материалов, он основан на электрохимическом осаждении металла под действием электрического тока. Гальванические металлопокрытия получили широкое распространение для защитно-декоративной отделки разнообразных изделий и для технических целей при изготовлении различных машин и приборов. Изделия, на которые нанесены гальванические покрытия приобретают более эстетичный внешний вид и физико-механические характеристики (повышенные износостойкость, отражательная способность, электропроводность, теплостойкость, теплопередача, твёрдость, механическая прочность, стойкость к растворителям, свету, атмосферным и другим воздействиям). Без особых проблем можно наносить гальванические покрытия на металлы и их сплавы, например, на алюминий, медь, сталь, олово. Небольшую трудность составляет нанесение металлопокрытий на диэлектрики, в этом случае сначала поверхности изделия придают электропроводные свойства. Эту операцию проводят разными способами, но химическое восстановление меди на поверхности диэлектрика в качестве электропроводного слоя показало наилучшие результаты. Гальваническое нанесение меди является наиболее распространённым, простым и дешёвым, поэтому в работе рассматривались именно гальванические медные покрытия.

Основная проблема нанесения гальванических покрытий заключается в неравномерном осаждении меди по всей поверхности изделия. Неравномерное осаждение меди зависит от того, насколько неравномерна плотность тока на поверхности изделия. Чем выше плотность тока на каком-либо участке, тем быстрее там будет осажаться медь. Неравномерное осаждение меди может вызывать появление разнообразных дефектов на медной поверхности. Эти дефекты проявляются в виде вертикальных полос, шероховатости, дендритов (шишек). Неравномерное осаждение меди может зависеть от многих факторов: геометрия изделия, состав электролита, неравномерная электропроводность поверхности изделия, расположение анодных медных пластин относительно изделия и др. [1]. Изменяя состав электролита и расположение анодных пластин относительно изделия, не получилось полностью избавиться от появления дефектов. Известно, что при увеличении температуры электролита

увеличивается его проводимость, поэтому было принято решение проверить, получится ли с повышением температуры электролита добиться лучшего качества медного покрытия.

Цель работы: исследовать, как изменяются свойства медного покрытия при увеличении температуры электролита (рис. 1 и рис. 2).

Рецепт 1 литра электролита, который использовался в работе: 200 г сернокислой меди, 180 г автомобильного электролита, 15 г изопропилового спирта. Для приготовления электролита в тёплой дистиллированной воде следует растворять рассчитанные количества компонентов в последовательности, приведённой в рецептуре. Анодные медные пластины располагались вокруг изделия, расстояние между изделием и пластинами было 10-20 см. В экспериментах использовались изделия, напечатанные на 3D принтере, с электропроводным слоем, полученным при химическом восстановлении меди. Оптимальная плотность тока составляет  $2,5 \text{ А/м}^2$ , при такой плотности тока скорость наращивания толщины медного покрытия составляет 60 мкм/ч.

Равномерного нагрева электролита без перемешивания раствора не может быть. Для этих целей использовалась магнитная мешалка с якорем. Было замечено, что просто перемешивание электролита без его нагрева приводит к уменьшению кристаллов меди и немного более её равномерному осаждению.

Для поддержания постоянной температуры использовался цифровой терморегулятор W3230 с датчиком. В терморегулятор встроено реле, которое замыкает установленный в цепь нагреватель и отключает его при достижении выставленной температуры. Датчик и нагреватель погружаются в электролит, а значит, они должны быть стойкими к серной кислоте, которая содержится в электролите, так как ионы железа оказывают негативное воздействие на качество электролита. Внешняя оболочка датчика состоит из нержавеющей стали, было принято решение установить датчик в стеклянную пробирку, а для хорошей теплопроводности между датчиком и стеклом использовать термопасту. В качестве нагревателя использовался ТЭН мощностью 150 Ватт, его оболочка тоже состоит из нержавеющей стали. Были попытки изолировать нагреватель от кислоты так же, как и датчик, но из-за густоты термопасты в пробирке оставался воздух, который при нагревании расширялся и разрушал пробирку. На ТЭН было нанесено гальваническое медное покрытие, такое покрытие медленно растворяется в электролите, но его можно в любой момент повторно нанести. ТЭН нельзя полностью погружать в электролит из-за негерметичного соединения проводов с ним, и возвышаться над поверхностью раствора он не должен, так как электролит у поверхности начинает закипать от сильного нагрева. Для решения этой проблемы к верхнему концу ТЭНа была герметично приварена медная трубка, которая позволила полностью погрузить ТЭН в раствор.



Рис. 1. Меднение без нагрева электролита



Рис. 2. Меднение с нагревом электролита

Проводились исследования с нагревом электролита от 25 до 45 градусов Цельсия с шагом в 2,5 градуса. При каждой температуре наносились гальванические покрытия на 2 изделия. После нанесения покрытий проводилась визуальная оценка качества. Изделия проверялись на наличие дефектов, а также проверялась равномерность нанесения медного покрытия. Изменения медных покрытий наблюдались при увеличении температуры электролита до 35 градусов: поверхность становилась гладкой с характерным блеском, дендриты становились меньше и малозаметными. При нагревании выше

35 градусов изменения прекратились, было только замечено, что электролит стал испаряться в разы интенсивнее, поэтому смысла его нагревать дальше не было.

В результате проделанной работы сделаны выводы, что нагревание электролита значительно улучшает качество гальванического медного покрытия, делая его более равномерным и аккуратным (рис. 1 и рис. 2).

Для получения наилучшего медного покрытия следует поддерживать температуру раствора в районе 30-35 градусов. Из минусов можно отметить, что при нагревании электролит испаряется интенсивнее, чем при комнатной температуре. Это значит, что необходимо чаще корректировать содержание компонентов в растворе и более эффективно проветривать помещение. Как проводится анализ медного электролита на содержание компонентов, подробно описано в книге [2].

#### Библиографические ссылки

1. Мелашенко Н. Ф. Гальванические покрытия диэлектриков: справочник. Мн.: Беларусь 1987. С. 113-114.
2. Одноралов Н. В. Занимательная гальванотехника: учебное пособие. М.: Просвещение, 1965. С. 16-17.

#### References

1. Melashhenko N. F. *Gal`vanicheskie pokry`tiya die`lektrikov* [Galvanic coatings of dielectrics]. Minsk, Belarus`, 1987, p. 113-114.
2. Odnoralov N. V. *Zanimatel`naya gal`vanotexnika* [Entertaining electroplating]. Moscow, Prosveshhenie, 1965, p. 16-17.

© Хафизов А. Р., 2023

УДК 625.85

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БИТУМНО-ПОЛИМЕРНОЙ МАСТИКИ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ

М. А. Худoley<sup>1</sup>, Е. И. Лесик<sup>2</sup>, Е. П. Венченко<sup>2</sup>, О. Г. Волчкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

\* E-mail: khudoley\_marina@mail.ru

*Нами изучены физико-механические и реологические характеристики битумно-полимерных мастик используемых для строительства, ремонта швов ангаров и покрытий летного поля*

*Ключевые слова: мастика, битум, термоэластопласт, полиолефин, дисперсный наполнитель.*

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF BITUMEN-POLYMER MASTIC BASED ON SECONDARY POLYOLEFINS

M. A. Khudoley<sup>1</sup>, E. I. Lesik<sup>2</sup>, E. P. Venchenko<sup>2</sup>, O. G. Volchkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
79 Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

\* E-mail: khudoley\_marina@mail.ru

*We have studied the physico-mechanical and rheological characteristics of bitumen-polymer mastics used for the construction, repair of hangar seams and airfield coatings*

*Keywords: mastic, bitumen, thermoplastics, polyolefin, dispersed filler.*

Современные строительные материалы, к которым относятся мастики для изоляционных кровельных, ремонтных работ, гидроизоляции должны обладать комплексом эффективных эксплуатационных характеристик, к таким относятся: повышенная водо-, износо-, термостойкость, адгезионные свойства, долговечность, широкий температурный интервал использования. Для получения битумных мастик с требуемыми технологическими и эксплуатационными свойствами для строительства и ремонта ангаров, летного поля используется модификация битума полимерами и природными наполнителями природного и техногенного характера.

В целях снижения себестоимости мастик, актуальными являются исследования, направленные на внедрение в состав полимерно-битумных мастик вторичных полиолефинов. Одним из методов утилизации полимерных отходов, привлекающим в последние годы всё больше внимание, является использование технологии замкнутого цикла в области пластмасс. Замена части термоэластопласта на вторичные полиолефины позволит не только снизить стоимость продукции и регулировать температурный интервал использования композиции, но и увеличить сопротивление мастики термическому и термоокислительному старению.

Целью работы являлось разработка технологии получения битумно-полимерной мастики холодного применения содержащей ТЭП и вторичный полиэтилен высокого давления (ВПЭВД).

Нами оценивалось влияние содержания ВПЭВД на комплекс технологических и эксплуатационных характеристик мастик холодного применения на основе битума в соответствии с требованиями ГОСТ 30693-2000, ГОСТ Р 55400-2013, ГОСТ 32870-2014.

В результате проведенных экспериментов показана эффективность модификации битума комбинацией термоэластопласта ДСТ Л 30-01 и полиэтилена ВД. Установлено, что введение полиэтилена ВД в количестве 1,0-3,0 масс. ч., приводит к существенному улучшению ряда физико-механических свойств, а именно: увеличению температуры размягчения, уменьшению пенетрации, расширению температурного интервала работоспособности полимер-битумной композиции.

Выявлен характер влияния состава растворителя на кинетику набухания термоэластопласта и температуру фазового перехода полиэтилена. Оптимальной термодинамической совместимостью с полимером обладает растворитель в состав которого входят н-алканы:толуол (25:75). В связи с этим, в качестве растворителя рекомендовано использование уайт-спирита в комбинации с ксилолом. Показано, что введение полимеров в растворе ускоряет процессы гомогенизации смеси с битумом, сокращает время смешения в 2-4 раза и снижает температуру приготовления композиции на 10- 20 °С.

Разработаны рецептуры полимер-битумных мастик для холодного применения с использованием комбинации полимеров ДСТ Л 30-01, полиэтилена ВД и наполнителей. Установлено, что использование в качестве наполнителя строительной извести 10 масс.ч. регулирует адгезионные свойства битум полимерной мастики.

Предложена технологическая схема и проведено экономическое обоснование предлагаемой технологии производства мастик для холодного применения с использованием полимерной основы, содержащей комбинацию ТЭП ДСТ Л 30-01, полиэтилена ВД и наполнителя.

© Худолей М. А., Лесик Е. И., Венченко Е. П., Волчкова О. Г., 2023

УДК 546.34

## ЛИТИЙ: ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА И РЫНКА СБЫТА

М. В. Чижевская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: chizhevskay\_mv@list.ru

*В данной статье кратко описаны промышленные технологии получения лития, как стратегически важного материала, используемого в аэрокосмической отрасли. Приведен анализ международного литиевого рынка.*

*Ключевые слова: литий, сподумен, технология производства.*

## LITHIUM: OVERVIEW OF PRODUCTION TECHNOLOGIES AND SALES MARKET

M. V. Chizhevskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: chizhevskay\_mv@list.ru

*This article briefly describes industrial technologies for the production of lithium, as a strategically important material used in the aerospace industry. The analysis of the international lithium market is given.*

*Keywords: lithium, spodumen, production technology.*

Литий и его соединения имеют широкий спектр применения: от медицины до авиастроения. Рост интереса к производству лития возрос в связи с широким использованием литий-ионных источников тока. Добыча лития и производство литиевой продукции характеризуется стабильным ростом, так как развития технологий в металлургии и разработки месторождений литиеносного сырья снизили её стоимость. Соединения лития в настоящее время приобрели исключительную важность в современных технологиях, в силу чего добыча лития и литиевой продукции и его роль во многих отраслях неуклонно и устойчиво возрастает [1].

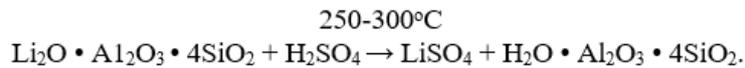
Источниками для сходного сырья лития служат: солевые растворы из озёр, богатых солями лития, и минеральное сырьё, например, сподумен – силикат лития и алюминия  $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , петалит – алюмосиликат  $(\text{Li}; \text{Na})[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$ , лепидолит – водный алюмосиликат из группы литиевых слюд –  $\text{RLi}_{1,5}\text{Al}_{1,5}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{F}, \text{OH})_2$  [2].

Сподумен –  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$  является одним из основных промышленных минералов лития. Для извлечения лития из сподуменового концентрата может быть использовано большое число известных способов: сульфатный, сернокислотный и другие [3,4].

В промышленной практике преимущественно применяют три способа переработки литиевых концентратов: сернокислотный, сульфатный и известковый. Кроме того, иногда используют известково-хлоридный способ [2].

Предприятия Красноярского края применяют сернокислотный способ разложения сподуменовых концентратов. В результате разложения концентрата концентрированной серной кислотой при 200-250 °С и последующего выщелачивания продукта водой получают растворы, содержащие сульфат лития, из которых осаждают карбонат лития. В технологическом цикле для разложения сподумена проводят первоначальную термическую обработку при 1100 °С для превращения  $\alpha$ - в  $\beta$ -сподумен ( $\alpha$ -сподумен практически не разлагается серной кислотой.). Обжиг проводят в барабанной печи.

Особенность взаимодействия серной кислоты с  $\beta$ -сподуменом состоит в замещении катионов лития протонами кислоты при сохранении структуры  $\beta$ -сподумена:



Поскольку кремний и алюминий остаются в кристаллической решетке алюмосиликата, литий избирательно извлекается в водный раствор, который поэтому содержит сравнительно мало примесей. Концентрат и серную кислоту смешивают при 250 °С, в результате чего протекает сульфатизация. Сульфатизированный материал выщелачивают водой, подавая в реактор карбонат кальция для нейтрализации избытка серной кислоты (до pH = 6-6,5). Отфильтрованный раствор очищают от магния нейтрализацией известью (pH = 12-14), а затем от кальция осаждением  $\text{CaCO}_3$  содой. Примеси железа и алюминия осаждают в форме гидроксидов при pH = 7 при одновременной выпарке раствора до концентрации  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  200 г/л. После отделения осадка фильтрацией из раствора осаждают карбонат лития насыщенным раствором соды. Промытые осадки содержат 96-97 %  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Извлечение в карбонат из сподуменного концентрата составляет 85 – 90 % [2,3,4].

Мировые запасы лития оцениваются в 28 млн. т. в пересчете на металл, или в 149 млн. т. в пересчете на карбонат лития. Порядка 65 % этих запасов сосредоточено в Чили (месторождение Salar de Atacama), Боливии (месторождение Salar de Uyuni) и Аргентине (месторождение Salar del Hombre Muerto). Карбонат лития извлекают из рапы соленых озер и литиевых минералов. При этом на рапу соляных озер приходится три четверти учтенных мировых запасов. По оценкам и расчетам группы «MetalResearch», мировой рынок лития и его соединений в 2022 году показал заметное увеличение объема продаж: за 6 месяцев аналитики «MetalResearch» оценили изменение объема продаж на рынке лития и соединений на 126,9% до уровня 2 146 617 тыс. долл. [5,6].

Доли стран поставщиков на рынке лития и соединений меняются ежеквартально, не говоря уже о ежегодном изменении. Также меняется и рейтинг стран поставщиков. Во 2-м квартале 2022 года на первые места, не считая России вышли: Китай (32,69%), Чили (26,39%), Республика Корея (13,35%). По результатам анализа, среди других заметных стран-поставщиков: США (7,47%), Нидерланды (5,38%), Бельгия (4,19%), Великобритания (3,31%), Боливия (1,87%), Франция (1,11%), Германия (0,77%) и другие страны (3,37%).

По оценке компании «Roskill», за последние 10 лет мировое производство карбоната лития возросло более чем на 178 тыс. т/год. Прирост производства в основном обеспечивается тремя странами – Аргентиной, Чили и Китаем. На них приходится три четверти мировой добычи лития и его соединений. Сейчас (по данным на 2022 г.) в мире производится более 300 тысяч тонн лития в год. 85% производства осуществляется в трех странах: Чили, Австралии и Аргентине. Около 90% мирового производства лития контролируется четырьмя компаниями: Albemarle (США), FMC (США), Sociedad Química y Minera de Chile (Чили), Tianqi Lithium (Китай).

Потребление лития и его соединений за последние 10 лет увеличилось в 3–4 раза за счет новых высокотехнологичных отраслей производства. Структура потребления литиевых продуктов показана на рис. 1 (по данным «MetalResearch») [5,6].

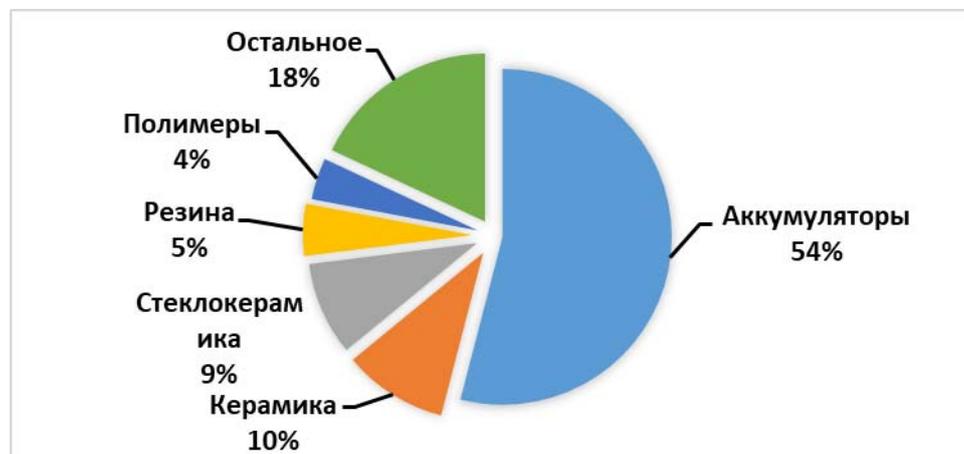


Рисунок 1. Структура потребления литиевых продуктов [5]

По данным Минпромторга, Россия по объему прогнозных ресурсов лития (1 млн. т.) входит в десятку ведущих стран в мире. Но госбаланс учитывает только рудный литий (260 тыс. т), а в Иркутской области, Якутии, Красноярском крае распространены подземные литиеносные воды, сопутствующие нефтегазоносным залежам. Единственным производителем литиевых продуктов в России является ОАО «ТВЭЛ» ГК «Росатом». Соли лития, гидроксид лития и металлический литий выпускают ее дочерние предприятия: ОАО «Химико-металлургический завод» (г. Красноярск) и ОАО «Новосибирский завод химконцентратов» (г. Новосибирск).

#### Библиографические ссылки

1. Саркаров Р. А., Белан С. И., Гусейнов Н. М. Оценка современного состояния и перспективы добычи лития и его соединений в России // Индустриальная экономика № 2. Т.1. 2022 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovremennogo-sostoyaniya-i-perspektivy-dobychi-litiya-i-ego-soedineniy-v-rossii/viewer> (дата обращения 12.09.2023)
2. ИТС 24 «Производство редких и редкоземельных металлов.. М: Бюро НДТ, 2017
3. Остроушко Ю.И., Бучихин П.И., Алексеева В.В. и др. Литий, его химия и технология. М.: Атомиздат, 1960. – С.12-18.
4. Плющев В.Е., Степин Б.Д. Химия и технология соединений литий, рубидия и цезия. М.: Химия, 1970. – С.226-272
5. Сайт «Фонд Сколково» [https://files.sk.ru/navigator/company\\_files/1120547/1640276315\\_NewChem-TechnologyLitium-project.pdf](https://files.sk.ru/navigator/company_files/1120547/1640276315_NewChem-TechnologyLitium-project.pdf) (дата обращения 12.09.2023)
6. Рынок лития и соединений 2022 Сайт: MetalResearch. URL: <https://metalresearch.ru/> (дата обращения 12.09.2023)

#### References

1. Sarkarov R. A., Belan S. I., Guseynov N. M. Otsenka sovremennogo sostoyaniya i perspektivy dobychi litiya i ego soedineniy v Rossii // Industrial'naya ekonomika № 2. T.1. 2022 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovremennogo-sostoyaniya-i-perspektivy-dobychi-litiya-i-ego-soedineniy-v-rossii/viewer> (data obrashcheniya 12.09.2023)
2. ITS 24 «Proizvodstvo redkikh i redkozemel'nykh metallov.. M: Byuro NDT, 2017
3. Ostroushko Yu.I., Buchikhin P.I., Alekseeva V.V. i dr. Litiy, ego khimiya i tekhnologiya. M.: Atomizdat, 1960. – S.12-18.
4. Plyushchev V.E., Stepin B.D. Khimiya i tekhnologiya soedineniy litiy, rubidiya i tseziya. M.: Khimiya, 1970. – S.226-272
5. Sayt «Fond Skolkovo» [https://files.sk.ru/navigator/company\\_files/1120547/1640276315\\_NewChem-TechnologyLitium-project.pdf](https://files.sk.ru/navigator/company_files/1120547/1640276315_NewChem-TechnologyLitium-project.pdf) (data obrashcheniya 12.09.2023)
6. Rynok litiya i soedineniy 2022 Sayt: MetalResearch. URL: <https://metalresearch.ru/> (data obrashcheniya 12.09.2023).

© Чижевская М. В., 2023

УДК 547

## СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ КООРДИНАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НОВЫХ БЕТА-ДИКЕТОНОВ И КЕТОИМИНОВ НА ИХ ОСНОВЕ

П. Р. Юнусова<sup>1\*</sup>, А. А. Кукушкин<sup>2</sup>, И. С. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет Институт цветных металлов  
Российская федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79к4  
\*E-mail: yunusova.paulina@yandex.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

*В качестве исследовательской задачи авторами было определено проведение синтеза ранее неизвестных кетоиминов, а также получение комплекса меди (I) с последующим изучением координационных свойств полученных лигандов.*

*Ключевые слова: люминесценция, полидентатные лиганды, синтез кетоиминов, синтез бета-дикетонов, синтез комплекса меди (I).*

## SYNTHESIS AND STUDY OF COORDINATION PROPERTIES OF NEW BETA-DIKETONES AND KETOIMINES BASED ON THEM

P. R. Yunusova<sup>1\*</sup>, A. A. Kukushkin<sup>2</sup>, I. S. Ponomarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University Institute of Non-Ferrous Metals  
79k4, Svobodny avenue, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation  
\*E-mail: yunusova.paulina@yandex.ru

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*As a research task, the authors determined the synthesis of previously unknown ketoimines, as well as the preparation of copper (I) complexes with further study of coordination properties of the obtained ligands.*

*Keywords: luminescence, polydentate ligands, synthesis of ketoimines, synthesis of beta-diketones, synthesis of copper (I) complex.*

Одним из наиболее многообещающих классов люминофоров на данный момент является 2,1,3-бензотиадиазол (btd) и его производные, в связи с незатруднительными и доступными методами получения, а так же за счет показанных ранее фото- и электролюминесцентных свойств. В особенности, было показано, что производные btd характеризуются высокими квантовыми выходами, что не мало важно для создания органических светодиодов [1]. Кроме того, они могут быть применены в качестве биохимических маркеров для диагностики болезней печени или раковых новообразований. Другим полезным свойством хелатообразующих лигандов, содержащих координационные центры различной природы, такие как N, O, S, является экстракция драгоценных металлов. [2,3]

Модифицирование природы лиганда в координационных соединениях переходных металлов дает возможность целенаправленно изменять свойства этих соединений в широких пределах, добиваясь не только желаемого сочетания физико-химических характеристик, но и высокой реакционной способности. Это позволяет решать одну из главных задач современной химии – создание материалов с заданными практически полезными и необходимыми свойствами. Поэтому разработка методов синтеза новых лигандов является актуальной темой. Наибольший интерес представляют полидентатные лиганды в которых содержатся координационные центры различной природы, например, гетероциклы.

Для решения поставленной задачи по реакции Кляйзена были синтезированы замещенные дикетоны из сложных эфиров бензойной кислоты и ацетона. В дальнейшем полученные соединения вво-

дили в конденсацию с 4-амино-2,1,3-бензотиадиазолом по уже известной методике с получением ранее неизвестных кетоиминов. Схема синтеза представлена на рис. 1. [1]

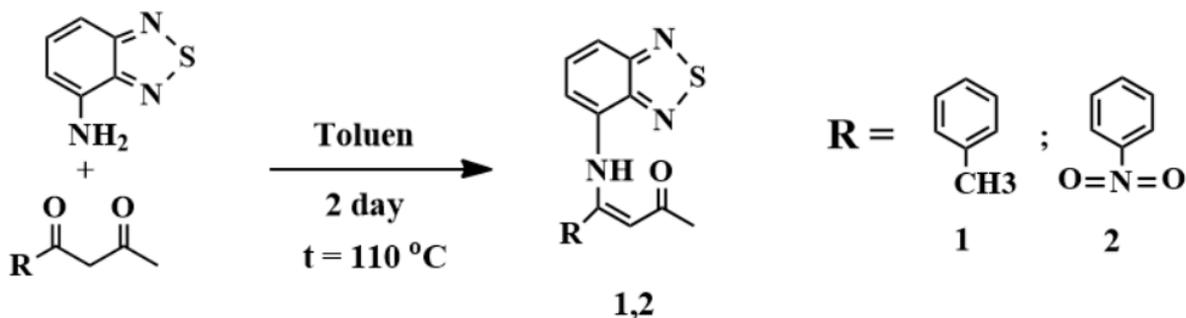


Рис. 1. Синтез ранее неизвестных кетоиминов

Начаты работы по изучению координационных свойств новых соединений. В результате взаимодействия (Z)-4-((2H-бензо[d]имидазол-4-ил)амино)-4-(п-толил)бут-3-ен-2-она с хлоридом меди (I) наблюдалось образование кристаллического осадка, как и отображено на рис. 2. Изучение ИК и ЯМР спектров этого осадка показало, что это комплекс данного енаминона с медью. Данные спектров приведены в таблице 1.

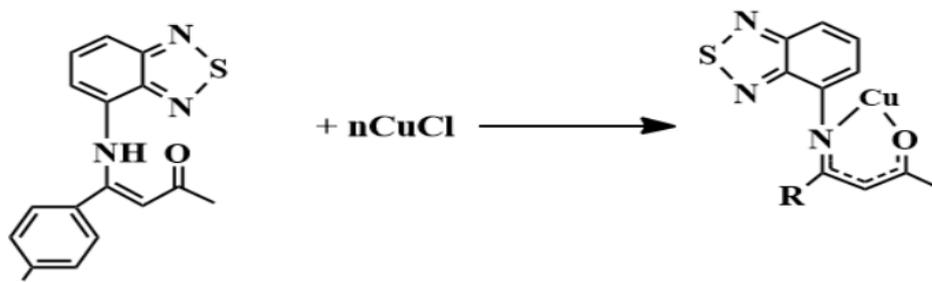


Рис. 2. Синтез комплекса меди (I) с кетоимином

Таблица 1

**Результаты ИК и ЯМР спектров синтеза новых кетоиминов (3,4) и кристаллического осадка (3\*)**

Номер	ЯМР <sup>1</sup> H, м.д.	ИК, см <sup>-1</sup>	Выход, %
1	7.62 м.(H, Ar), 7.53 м.(H, Ar), 7.31(6H, Ar), 7.25(6H, Ar), 6.85 м.(H, Ar), 4.19(H, NH), 2.51 м.(3H, CH <sub>3</sub> ), 2.27(3H, CH <sub>3</sub> )	1725(C=O), 1631(NH), 1611(C-C, Ar)	87
2	8.70 м.(6H, Ar), 8.40 м.(6H, Ar), 7.62 м.(H, Ar), 7.53 м.(H, Ar), 6.85 м.(H, Ar), 4.16(H, NH), 2.21(3H, CH <sub>3</sub> )	1737(C=O), 1620(NH), 1604(C-C, Ar)	85
3	7.62 м.(H, Ar), 7.53 м.(H, Ar), 7.31(6H, Ar), 7.25(6H, Ar), 6.85 м.(H, Ar), 4.19(H, NH), 2.51 м.(3H, CH <sub>3</sub> ), 2.27(3H, CH <sub>3</sub> )	1835(C=O), 1611(C-C, Ar)	56

В  $^1\text{H}$  ЯМР спектра были зафиксированы полосы поглощения которые можно отнести к ароматическому кольцу замещенного бензола, сочлененного цикла бензотиадиазола, а так же пики характерные для аминогруппы и метилена. Сигналы протонов в ЯМР спектре комплекса, отличались уширением, что можно объяснить влиянием меди, но никуда при этом не смешались. В ИК спектрах было зафиксированы полосы поглощения, которые можно отнести к  $\text{NH}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}-\text{C}$  ароматическое. В спектре комплекса меди (I) было замечено смещения полосы поглощения карбонильной группы относительно исходного кетоимина из чего можно сделать вывод, что в ходе реакции медь была скоординирована кислородом. Это также подтверждается отсутствием полосы поглощения  $\text{NH}$ -группы. [4]

Таким образом, в ходе работы были отработаны методики синтеза новых хелатных лигандов, содержащих пиразолильные и бензотиадиазолильные заместители. Полученные соединения изучены методами ИК и  $^1\text{H}$  ЯМР спектроскопии.

Авторы выражают благодарность Иваненко Т. Ю. за снятие ЯМР спектров.

#### Библиографические ссылки

1. Сухих Т.С., Баширов Д.А. // RSC Adv. 2016. No. 6. P. 43901-43910
2. Огиенко Д. С. // Известия академии наук. 2019 №4., 651 – 661 с.
3. Конте Г., Бортолуцци А.Ж., Гальярдо Х. // Синтез. 2006. № 23. P.3945-3947
4. Трофименко С. // Журнал Американского химического общества. 1970.V. 92. P. 5118-5126
5. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений / Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. – М.: Мир, 2006. – 439с.

#### References

1. Sukhikh T. S., Bashirov D. A. // RSC Adv. 2016. №6. P. 43901-43910
2. Ogienko D. S. // Proceedings of the Academy of Sciences. 2019 №4. P. 651–661
3. Conte G., Bortoluzzi A.J., Gallardo H. // Synthesis. 2006. № 23. P. 3945-3947
4. Trofimenko, S. // Journal of the Amerisan Chemisal Societu. 1970.V. 92. P. 5118-5126
5. Pretsch E., Bühlmann F., Affolter K. Structure determination of organic compounds / Pretsch E., Bühlmann F., Affolter K. – М.: Mir, 2006. – 439с.



**Секция**

**«ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»**

УДК 502/504

## ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ФАКТОРОВ РИСКА ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ СФО

М. Н. Аникин, О. В. Тасейко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: maxim.nikolaevich@icloud.com

*Проанализирована динамика риска возникновения опасных природных явлений на территории СФО за период 2000-2017 гг. Выполненный анализ показал, что полученные значения реализованных рисков возникновения природных пожаров и наводнений зависят в большей степени от погодных условий. Полученные результаты показывают, что принимаемых для минимизации рисков мероприятий недостаточно для снижения вероятности возникновения опасных явления и уменьшения показателей ущерба.*

*Ключевые слова: оценка риска, экономический ущерб, гидрологические явления, природные пожары.*

## TEMPORAL DYNAMICS OF RISK FACTORS FOR HAZARDOUS NATURAL PHENOMENA IN THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT

M. N Anikin, O. V. Taseiko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: maxim.nikolaevich@icloud.com

*The dynamics of the risk of occurrence of hazardous natural phenomena in the Siberian Federal District for the period 2000-2017 is analyzed. The analysis showed that the obtained values of realized risks of wild-fires and floods depend to a large extent on weather conditions. The results obtained show that the measures taken to minimize risks are not enough to reduce the likelihood of dangerous phenomena occurring and reduce damage rates.*

*Keywords: risk assessment, economic damage, hydrological phenomena, natural fires.*

Природные и техногенные чрезвычайные ситуации на территории СФО возникают все чаще, что причиняет значительный ущерб населению, экономике и экосистеме не только территории Сибири, но и всей страны [1].

Наиболее значимыми природными опасностями, вносящими существенный вклад в формирование территориальных рисков экосферы СФО, являются наводнения и лесные пожары. Сибирский Федеральный округ обладает обширной сетью рек, озер и водохранилищ. Среднее многолетнее значение показателя водных ресурсов речного стока в целом по Сибирскому федеральному округу составляет 4300 км<sup>3</sup>/год, при этом наибольших значений он достигает в Красноярском крае, наименьших в республике Алтай. Также Сибирь является одним из крупнейших лесных регионов в мире, около 220 млн га. покрыты лесной растительностью, играющей важную роль в глобальном углеродном цикле.

За период с 2000 по 2017 гг. по данным ЕБВУ и системы ИСДМ – Рослесхоз на территории СФО произошло порядка 95 000 опасных природных явлений. Наибольшее количество природных пожаров на территории СФО произошло в 2002 году, количество их превысило 10 тысяч, площадь поврежденного леса составила около 673 тыс га. леса, а ущерб превысил 260 млн. рублей. За рассмотренный период зафиксировано более 1300 опасных событий связанных с наводнениями, наибольшее количество которых произошло в 2006 году – около 300 событий с затоплением 25 населенных пунктов

на территории Республик Тыва и Хакасия, Томской, Кемеровской, Иркутской областей и Алтайского и Красноярского края с суммарным ущербом более 450 млн. рублей. На рис. 1 показана временная динамика количества опасных природных явлений [2–3].

Оценка ущербов от возникновения лесных пожаров основывалась на затратах на лесовосстановление, наводнений – на стоимости разрушенных зданий и сооружений. Ущерб от лесных пожаров в среднем превышает ущербы от наводнений для территории СФО [4].

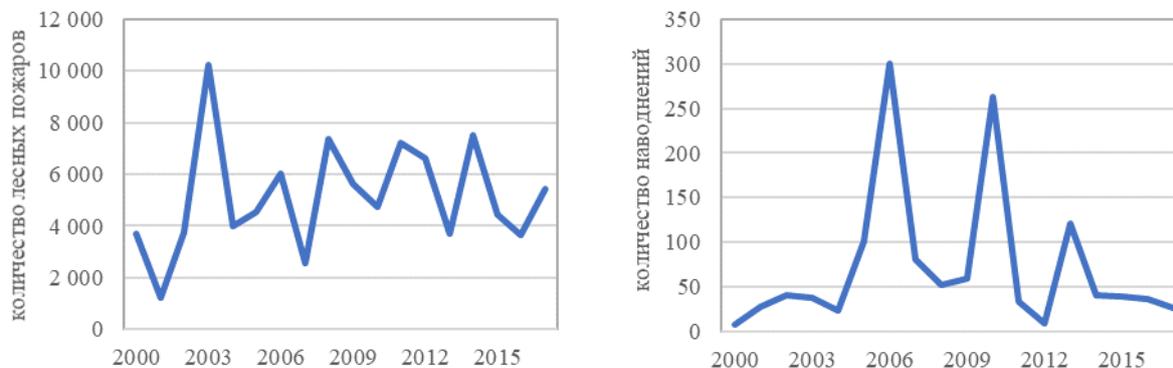


Рис. 1 – Временная динамика количество опасных природных явлений на территории СФО

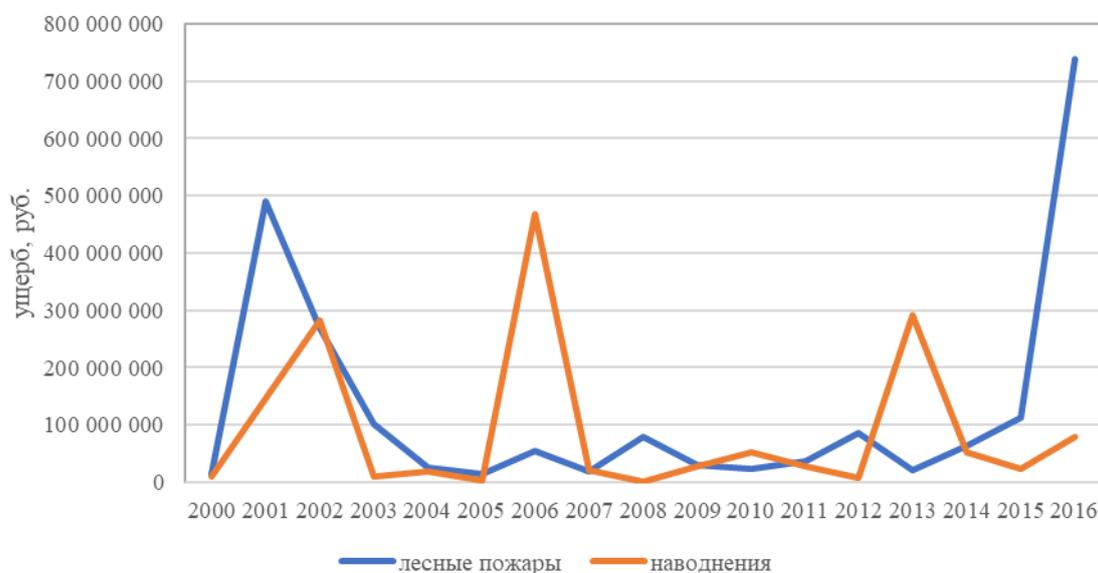


Рис. 2 Динамика годовых значений ущерба от опасных природных явлений на территории СФО

Для каждого муниципального образования СФО выполнялась количественная оценка рисков возникновения опасных природных явлений (ОПЯ) – наводнений, лесных пожаров с учетом ущербов на основе данных систем мониторинга за 2000 – 2017 годы [5].

Территории СФО характеризуются высоким уровнем риска возникновения опасных природных явлений, обусловленных климатическими и географическими особенностями региона. Анализ временной динамики показал, что риск природных пожаров за рассмотренный период увеличился, риск наводнений уменьшился незначительно. Связано это, в первую очередь, с меняющимися климатическими условиями, а предпринимаемые к повышению защищенности меры существенный вклад в снижение рисков не вносят. Таким образом, проблема разработки и реализации эффективных мер по предотвращению и управлению природными бедствиями для защиты жизни, имущества населения и экосферы в целом не теряет своей актуальности.

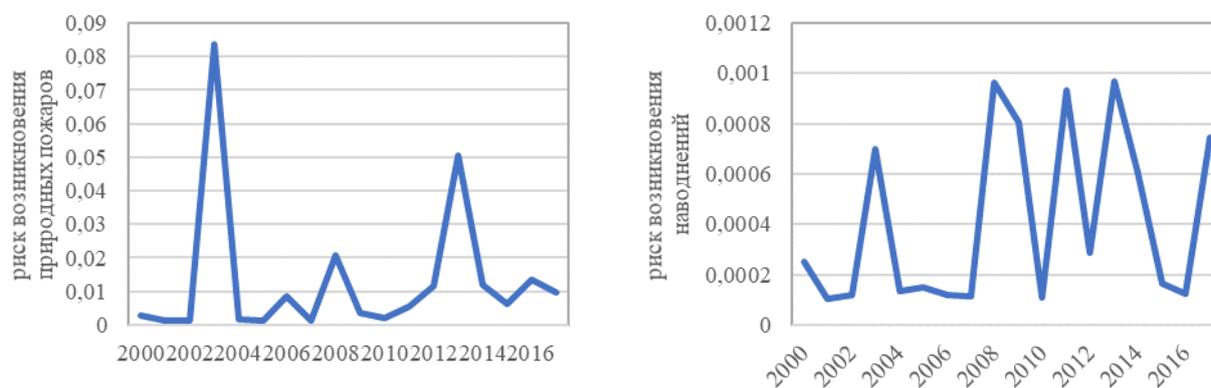


Рис 3 – Годовая динамика рисков возникновения опасных природных явлений на территории СФО

### Библиографические ссылки

1. Тенденции изменений рисков опасных природных явлений российской Арктики, на примере лесной зоны Восточной Сибири // eLibrary- научная электронная библиотека URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_50083115\\_94496896.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_50083115_94496896.pdf) (дата обращения: 09.09.2023).
2. ИСДМ Рослесхоз // ФБУ "Авиалесоохрана" URL: <https://aviales.ru/default.aspx?textpage=117> (дата обращения: 09.09.2023).
3. Енисейское БВУ. Мониторинг водных объектов // РОСВОДРЕСУРСЫ Енисейское БВУ URL: <https://enbv.ru/index.php> (дата обращения: 09.09.2023).
4. ФИЦ ЕГС РАН <http://eqru.gsras.ru/events/run/index.php>
5. Приказ Рослесхоза от 03.04.1998 N 53 "Об утверждении Инструкции по определению ущерба, причиняемого лесными пожарами". URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_31959/5f4bed452dc0105baf6db594cad944092e1e0587/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_31959/5f4bed452dc0105baf6db594cad944092e1e0587/)

### References

1. Trends in changes in the risks of natural hazards of the Russian Arctic, on the example of the forest zone of Eastern Siberia // eLibrary- scientific electronic library URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_50083115\\_94496896.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_50083115_94496896.pdf) (date of application: 09.09.2023).
2. ISDM Rosleskhoz // FBU "Avialesookhrana" URL: <https://aviales.ru/default.aspx?textpage=117> (date of application: 09.09.2023).
3. Yenisei BVU. Monitoring of water bodies // ROSVODRESURSY Yenisei BVU URL: <https://enbv.ru/index.php> (accessed: 09.09.2023).
4. FITC EGS RAS <http://eqru.gsras.ru/events/run/index.php>
5. The order of the Federal Forestry Agency of 03.04.1998 N 53 "On approval of the Instructions for determining the damage caused by forest fires." URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_31959/5f4bed452dc0105baf6db594cad944092e1e0587/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_31959/5f4bed452dc0105baf6db594cad944092e1e0587/)

© Аникин М. Н., Тасейко О. В., 2023

УДК 622:66-93

## МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА

Н. Л. Берденко, Н. Г. Черкасова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nbierdienko@gmail.com

*В работе определены основные причины и направления происхождения техногенных чрезвычайных ситуаций. Предложены предварительные пути решения организации безопасности работ.*

*Ключевые слов: моделирование, прогнозирование, мониторинг, техносфера, чрезвычайная ситуация, безопасность технологических процессов.*

## MONITORING AND FORECASTING OF TECHNOGENIC EMERGENCIES IN OIL AND GAS FIELDS

N. L. Berdenko, N. G. Cherkasova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nbierdienko@gmail.com

*The paper identifies the main causes and directions of the origin of technogenic emergencies. Preliminary ways of solving the organization of work safety are proposed.*

*Keywords: modeling, forecasting, monitoring, technosphere, emergency, safety of technological processes.*

В настоящее время в нефтегазовой отрасли идет кризис технологий, при этом постоянно растет уровень добычи и разрабатываются новые месторождения нефти и газа [1]. Распространенной причиной чрезвычайных ситуаций является человеческий фактор, формирующийся вследствие найма малоквалифицированного и неопытного персонала.

С каждым годом идет ужесточение требований законодательства в области охраны труда и промышленной безопасности. К примеру, пересматривались документы по расследованию несчастных случаев, типовые нормы выдачи СИЗ и смывающих средств. В области промышленной безопасности пересматривались Федеральные нормы и правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности [2]. Указанные меры нацелены на снижение количества и тяжести последствий чрезвычайных ситуаций.

К основным опасным факторам, которые могут привести к чрезвычайным ситуациям, относятся:

- пожаро- взрывоопасность производственной площадки выполнения работ по бурению;
- большое количество грузоподъемных операций, как с автомобильными кранами, так и работа таль-блока самой буровой установки [3];
- неблагоприятные и неорганизованные условия труда, к которым можно отнести плохое обеспечение вахтового городка, отсутствие обозначенных безопасных пешеходных зон, отсутствие знаков безопасности при выполнении работ повышенной опасности, неслаженные действия буровой бригады;
- выделение из скважины опасных токсических веществ, таких как попутный газ, сероводород;
- работа вблизи трубопроводов, находящихся под избыточным давлением и обслуживание оборудования находящегося под избыточным давлением;
- работы, выполняемые на высоте.

Основными объектами для ведения мониторинга и прогнозирования можно выделить, непосредственные места ведения буровых работ, так называемые кустовые площадки. Именно на этих объектах сфокусирована вся работа, задействовано большое количество сотрудников.

На кустовых площадках формируется высокий риск потенциально катастрофических последствий, которые необратимо изменят среду обитания в зоне месторождения, если их вовремя не предотвратить.

Обстоятельства происхождения чрезвычайных ситуаций можно условно разделить на следующие классы:

1. Выход из строя оборудования, при этом к причинам можно отнести:

- нарушение нормального режима работы, в связи с отказом электропитания;
- износ оборудования и трубопроводов (коррозия), из-за отсутствия должного контроля перед началом работ, что может повлечь его разрыв или разгерметизацию [4];
- предельная эксплуатация оборудования, сверхнормативных параметров;
- несвоевременное обслуживание манометров, предохранительных клапанов;
- несвоевременное обслуживание систем автоматической пожарной сигнализации и систем определения концентрации загазованности.

2. Ошибки персонала при выполнении всего спектра работ. Контроль необходимых параметров давления, загазованности, исправности работы оборудования. Неправильные действия при выполнении штатных работ.

3. Воздействия природного [5] и техногенного характера:

- природные явления (сильный ветер, грозовые разряды, лесные пожары, пониженная или повышенная температура воздуха);
- воздействия опасных промышленных объектов, находящихся вблизи объекта мониторинга и прогнозирования;
- перевозка опасных грузов.

Самым неблагоприятным исходом аварии в нефтегазовой отрасли является экологическая катастрофа. Для экологических катастроф техногенного происхождения применяют следующую классификацию:

- катастрофы, связанные с загрязнением природной среды; с механическими нарушениями природной среды; с потерей генофонда и биоразнообразия.

Для устранения последствий экологической катастрофы необходимы очень большие затраты, которые можно было бы направить на улучшение условий труда, качество дорог, закупку нового высокотехнологичного оборудования. Поэтому предупреждение экологических катастроф является очень важным фактором в развитии месторождений. Для осуществления контроля и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера авторами предлагается разработать и внедрить систему прогнозирования чрезвычайных ситуаций. При её разработке потребуются качественный подход по подбору экспертов и применение высокотехнологичного программного обеспечения для моделирования аварийных ситуаций. Большой спектр опасностей техногенного характера, выявленных в рамках аналитического анализа, требует разработать систему, позволяющую ее постоянно дополнять и совершенствовать.

Для разработки системы моделирования и прогнозирования чрезвычайных ситуаций авторами предусматривается следующий план действий:

1. Задействование экспертов для сбора и анализа уже произошедших аварий. Формирование базы данных.

2. Воссоздание на основании уже полученных и проанализированных данных, моделей чрезвычайных ситуаций, физических и математических. При этом, необходима функция изменения параметров в моменте времени, для применения моделей на практике, так как параметры в процессе аварии могут меняться.

3. Периодические тренировки с применением этих моделей и пополнение баз данных.

Для обеспечения эффективного функционирования описанной выше системы прогнозирования и мониторинга необходимо вовлечение большого числа специалистов и постоянное её совершенствование. При должном вовлечении научных центров, производственных объектов и образовательной среды в реализацию данного проекта, возникает ряд преимуществ за счёт формирования единой команды заинтересованных специалистов, что позволит контролировать систему на всех уровнях.

### Библиографические ссылки

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности // 2-е издание, перераб. и доп. СПб.: БВХ, Петербург, 2006. 704 с
2. РД 03-418-01 "Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов" (утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 10.07.2001 N 30), 2001. IV. 10 с.
3. Стариков А.В., Хлесткова У.А. Методика оценки профессионального риска в нефтегазовой отрасли как инструмент промышленной безопасности // Проблемы современной науки и образования, 2015. № 9 (39). С. 62-65.
4. Сейсмологический мониторинг взрывов и оценка их воздействия на населенные пункты и промышленные объекты на территории Оренбургской области /М.Ю. Нестеренко, Л.П. Маркова, А.А. Пелагеин // Сб. докл. XII Уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь, 2011. С. 161-164.
5. Ишанова О. С. Оценка экологического состояния почвы в зоне влияния предприятий нефтедобывающей промышленности// Вестник Оренбургского государственного университета, 2013. № 10. С. 261–263.

### References

1. Polovko A.M., Gurov S.V. Fundamentals of reliability theory = 2nd edition, reprint. and add. St. Petersburg: BHV, St. Petersburg, 2006. 704 p
2. RD 03-418-01 "Guidelines for conducting risk analysis of hazardous production facilities" (approved Resolution of Gosgortekhnadzor of Russia dated 10.07.2001 N 30), 2001. IV. 10 c.
3. Starikov A.V., Khlestakova U.A. Methods of assessing occupational risk in the oil and gas industry as an instrument of industrial safety // Problems of modern science and education, 2015. No. 9 (39). pp. 62-65.
4. Seismological monitoring of explosions and assessment of their impact on settlements and industrial facilities on the territory of the Orenburg region /M.Yu. Nesterenko, L.P. Markova, A.A. Pelagein // Collection of dokl. CP of the Ural Youth Scientific School of Geophysics. Perm, 2011. pp. 161-164.
5. Ishanova O. S. Assessment of the ecological state of the soil in the zone of influence of oil industry enterprises// Bulletin of Orenburg State University, 2013. No. 10. pp. 261-263.

© Берденко Н. Л., Черкасова Н. Г., 2023

УДК 331.45, 331.46

## ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ КОМПАНИИ «РУСАЛ»

Н. И. Борисов, Е. Н. Бельская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: borisovni95@mail.ru

*В работе проведен анализ статистики несчастных случаев и причин их возникновения на предприятиях компании «РУСАЛ», предложен ряд мероприятий по повышению уровня безопасности работников.*

*Ключевые слова: охрана труда, безопасность, несчастный случай, разработка.*

## IDENTIFICATION OF THE ACCIDENTS' CAUSES AT THE ENTERPRISES OF THE COMPANY "RUSAL"

N. I. Borisov, E. N. Belskaia

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: borisovni95@mail.ru

*The article analyzes the statistics of accidents and the causes of their occurrence at the enterprises of the company "RUSAL", suggests a number of measures to improve the safety of employees.*

*Keywords: labor protection, safety, accident, development.*

Охрана труда, промышленная и пожарная безопасность, а также предоставление сотрудникам качественных медицинских услуг – основа стабильной деятельности любого производства [1]. Компания «РУСАЛ» – крупнейший производитель алюминия, заботится о здоровье сотрудников, занимается профилактикой профессиональных и производственно обусловленных заболеваний, улучшает условия труда, проводит профилактику и информирование, внедряет современные средства индивидуальной защиты.

В сфере охраны труда, промышленной и пожарной безопасности главная цель компании «РУСАЛ» – нулевой показатель травматизма, полное исключение рисков возникновения аварий и пожаров. Для этого на каждом промышленном объекте компании выстроена вертикальная система управления охраной труда, промышленной и пожарной безопасностью, в которой задействованы все сотрудники и подрядные организации. Ежегодно «РУСАЛ» выделяет значительные средства на обеспечение охраны труда, в 2018 году на эти цели было направлено 49,3 млн долларов США.

На предприятиях компании один из самых низких в отрасли показатель LTIFR (коэффициент частоты травм с потерей рабочего времени), который составляет для мировой алюминиевой промышленности – 0,22. В таблице 1 приведены значения показателя LTIFR для предприятий компании «РУСАЛ», с учетом основного подрядчика ООО «ИСО» (ООО «Инжиниринг Строительство Обслуживание»), в пересчете на 200 000 отработанных человеко-часов, за период 2018-2022 гг. [2-4].

Таблица 1

Значения показателя LTIFR для предприятий компании «РУСАЛ»

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022
LTAFR	0,16	0,22	0,18	0,15	0,15

В таблице 2 представлены данные по несчастным случаям на предприятиях Компании «РУСАЛ» за 2020-2022 гг., в том числе со смертельным исходом [2-4].

## Несчастные случаи на предприятиях компании «РУСАЛ»

Сотрудники	2020		2021		2022	
	НС всего	НС со смертель- ным исходом	НС всего	НС со смер- тельным исхо- дом	НС всего	НС со смертель- ным исходом
Всего	98	7	117	12	107	5
РУСАЛ	85	2	82	7	85	4
Подрядные организаций	13	5	35	5	22	1

Согласно приведённым данным, в 2020 году было зафиксировано 7 смертельных случаев (2 – сотрудники компании, 5 – сотрудники подрядных организаций). Первый смертельный случай связан с горным ударом в шахте Североуральского бокситового рудника. Несмотря на оборудованную системой предупреждения о горных ударах шахту, не всегда хватает времени для безопасной эвакуации сотрудников. Более того, в настоящее время еще не найдено доступных технических решений для прогноза подобных явлений. Второй смертельный случай был зафиксирован в результате ДТП, произошедшего по неосторожности водителя.

В 2020 году основные причины опасных ситуаций были связаны с особенностями проведения горных работ, нахождением в зонах работающего оборудования, нарушениями при обслуживании оборудования и наличием различных опасных факторов на пешеходных проходах. По всем происшествиям было проведено расследование и осуществлены корректирующие мероприятия.

В 2021 году коэффициент частоты травм с потерей рабочего времени снизился на 17% по сравнению с 2020 годом. Наиболее распространенным видом производственных травм была легкая травма с временной утратой работоспособности. Несмотря на стремление компании снизить уровень несчастных случаев со смертельным исходом, погибли 12 человек.

В 2022 году коэффициент частоты травм с потерей рабочего времени не изменился по сравнению с предыдущим годом. Одним из самых серьезных несчастных случаев 2022 года стало происшествие на Братском алюминиевом заводе, где один из сотрудников, при управлении дизельным погрузчиком, задел траверсу бункера с анодной массой, опрокинув её на другого сотрудника. В ходе расследования было установлено, что сотрудник, управлявший погрузчиком, не имел соответствующего обучения и допуска, к управлению приступил самостоятельно, взяв оставленные в кабине ключи. После происшествия компанией были проведены дополнительные обучения с проверкой знаний всех водителей погрузчиков, изменена система выдачи и контроля ключей. Проверки водителей погрузчиков стали обязательными при посещении производственной зоны. Эти мероприятия были тиражированы на все предприятия Алюминиевого дивизиона.

Основными причинами тяжелого травматизма и происшествий со смертельным исходом в 2021-2022 гг. стали ошибки, вызванные человеческим фактором (нарушения требований безопасности, допущенные как самими погибшими, так и другими сотрудниками, при выполнении соответствующих работ). Наиболее распространенным видом производственных травм были переломы ног и рук при падениях, в результате поскользываний и спотыканий.

В 2021-2022 гг. на объектах компании уделялось повышенное внимание перемещению людей по территории предприятий, проведению внеплановых инструктажей для обсуждения опасных факторов, связанных с работой сотрудников и развитию у сотрудников навыков безопасного поведения.

Анализ несчастных случаев на предприятиях компании «РУСАЛ» показал, что проблема травматизма чрезвычайно актуальна, в период 2020-2022 гг. произошло 22 несчастных случая со смертельным исходом. Приоритетными целями компании являются предотвращение и устранение случаев причинения того или иного вреда работникам. В условиях современного производства отдельные частные мероприятия по улучшению условий труда оказываются неэффективными. Поэтому их необходимо осуществлять комплексно, образуя в общей системе управления производством подсистему управления охраной труда [5].

Проанализировав статистику травматизма можно сделать вывод, что система управления безопасностью труда персонала организована достаточно эффективно, количество травм со смертельным исходом в 2022 году снизилось, относительно 2020-2021гг. Проведенное исследование причин возникновения травм на предприятиях компании показывает, что основная их часть имеет организаци-

онный характер, значительно меньшая – технический. Основная категория работников, получивших производственные травмы, имеет небольшой опыт работы на предприятии (до 1 года), что свидетельствует о том, что неформализованная процедура адаптации нового персонала является одной из основных проблем в системе управления безопасностью труда персонала. Высокий коэффициент травматизма среди работников, имеющих стаж 4-10 лет, свидетельствует о недостаточной организационной работе по обеспечению производственной безопасности и охраны труда.

Для совершенствования системы управления безопасностью труда персонала и повышения уровня безопасности работников компании «РУСАЛ» предложены следующие мероприятия: улучшение качества процесса адаптации новичков; периодическое анкетирование сотрудников, с целью выявления проблем в существующей системе управления безопасностью труда на предприятиях компании; принятие предложений по промышленной безопасности и охране труда от сотрудников, работающих на предприятиях компании «РУСАЛ»; повышение уровня мотивации рабочих в части соблюдения техники безопасности; стимулирование работников за продолжительную безопасную работу.

### Библиографические ссылки

1. Жолобов, Н. М. Управление охраной труда в потребительской кооперации и организационно-экономические инструменты его совершенствования [Текст]: дис. канд. экон. наук / Н. М. Жолобов. – Белгород, 2014. – 198 с.
2. Новый ракурс. Отчёт об устойчивом развитии за 2020 год. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rusal.ru/upload/iblock/c90/sqwvwul2csftmf0bdss4k2kbsmvnqxtn.pdf> (Дата обращения: 15.08.2023). С. 39-46.
3. В центре внимания – человек. Отчёт об устойчивом развитии за 2021 год. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rusal.ru/upload/iblock/749/vjb1mj5ndij4neep8pnjervek7bczlpz.pdf> (Дата обращения: 15.08.2023). С. 48-50.
4. Больше, чем бизнес. Отчёт об устойчивом развитии за 2022 год. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rusal.ru/upload/iblock/d79/d3vg3fwdgalhzlchwmb5w5e0pkriqbjp.pdf> (Дата обращения: 15.08.2023). С. 48-54.
5. Иваныкина, Т. В. Система управления охраной труда на предприятии [Текст] / Т. В. Иваныкина, С. Ю. Игнатова [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». – М., 2014. – № 5.- Режим доступа: <http://naukovedinie.ru> (дата обращения: 15.08.2023).

### References

1. Zholobov, N. M. Upravlenie ohranoi truda v potrebitriskoii kooperatsii i organizacionno-ekonomicheskie instrumenti ego sovershenstvovanoya [Labor protection management in consumer cooperation and organizational and economic tools for its improvement]: dis. candidate of Economic Sciences / N. M. Zholobov. – Belgorod, 2014. – 198 p.
2. Nowyi rakurs. Otchet ob ustoychivom razvitii za 2020 god. [A new angle. Sustainability Report for 2020]. [Electronic resource]. Access mode: <https://rusal.ru/upload/iblock/c90/sqwvwul2csftmf0bdss4k2kbsmvnqxtn.pdf> (Date of application: 15.08.2023). P. 39-46.
3. V centre vnimaniya – chelovek. Otchet ob ustoychivom razvitii za 2021 god. [In the center of attention is a person. Sustainability Report for 2021] [Electronic resource]. Access mode: <https://rusal.ru/upload/iblock/749/vjb1mj5ndij4neep8pnjervek7bczlpz.pdf> (Date of application: 15.08.2023). P. 48-50.
4. Bolshe chem. bizness. Otchet ob ustoychivom razvitii za 2022 god. [More than a business. Sustainability Report for 2022]. [Electronic resource]. Access mode: <https://rusal.ru/upload/iblock/d79/d3vg3fwdgalhzlchwmb5w5e0pkriqbjp.pdf> (Date of application: 15.08.2023). P. 48-54.
5. Ivanykina, T. V. Sistema upravleniya ohranoi truda na predpriyatii [Occupational health and safety management system at the enterprise] / T. V. Ivanykina, S. Yu. Ignatova [Electronic resource] // Online journal "Science Studies". – М., 2014. – № 5.- Access mode: <http://naukovedinie.ru> (Date of application: 15.08.2023).

УДК 630.85

**ИНГАЛЯЦИОННЫЕ НЕКАНЦЕРОГЕННЫЕ РИСКИ  
НА ОСНОВАНИИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОТ БОЛЕЗНЕЙ  
ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАСЕЛЕНИЯ Г. КРАСНОЯРСКА**

Л. С. Калиманова<sup>1\*</sup>, О. В. Тасейко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Вычислительных и информационных технологий  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 53

\*E-mail: kalimanova.l@mail.ru

*Методология оценки эпидемиологических неканцерогенных рисков позволяет оценивать потенциальных последствий для здоровья человека при различных вариантах предшествующих и прогнозируемых экспозиций поллютантов. В статье рассмотрено влияние загрязнения атмосферного воздуха г. Красноярск на формирование рисков смертности от болезней пищеварительной системы.*

*Ключевые слова: неканцерогенный риск, эволюционные модели, атмосферный воздух.*

**INHALATION NON-CARCINOGENIC RISKS ON THE BASIS  
OF EVOLUTIONARY MODELS FOR DIGESTIVE SYSTEM DISEASES  
OF THE POPULATION OF KRASNOYARSK**

L. S. Kalimanova<sup>1\*</sup>, O. V. Taseyko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal Research Center for Information and Computational Technologies  
53, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: kalimanova.l@mail.ru

*The methodology for assessing epidemiological non-carcinogenic risks makes it possible to assess the potential consequences for human health under various options for previous and predicted exposures to pollutants. The article considers the impact of atmospheric air pollution in Krasnoyarsk on the formation of mortality risks from diseases of the digestive system.*

*Keywords: non-carcinogenic risk, evolutionary models, atmospheric air.*

Одной из проблем загрязнения атмосферного воздуха города Красноярск являются промышленные предприятия, которые участвуют в формировании высокой концентрации химических веществ за счёт выбросов специфических углеводородов в атмосферный воздух, из которых синтезируется канцерогенные и нейротоксические вещества. Это приводит к повышению рисков заболевания и смертности от изменений в состоянии нервной, эндокринной, иммунной, мочеполовой, пищеварительной, сердечно-сосудистой, дыхательной систем. Задачей исследования являлась оценка рисков заболеваний пищеварительной системы от ингаляционных воздействий, связанных с наличием диоксида серы в атмосферном воздухе г. Красноярск в период с 2013 по 2019 год, полученные на постах государственной сети мониторинга [1].

Для оценки накопления рисков использовались эпидемиологические модели, рекомендованные МР 2.1.10.0062-12.

Также в ходе исследования была использована первичная база случаев смерти и продолжительности жизни населения города Красноярск с 2013 по 2019 года, включающая данные смерти от болезней пищеварительной системы.

Для более полной характеристики рассматриваемого вопроса был получен результат, который приводит к следующему выводу, что смертность населения города Красноярска от болезней пищеварительной системы в 2016 году самая высокая, по сравнению с 2013 годом, как это показано на рис.1.

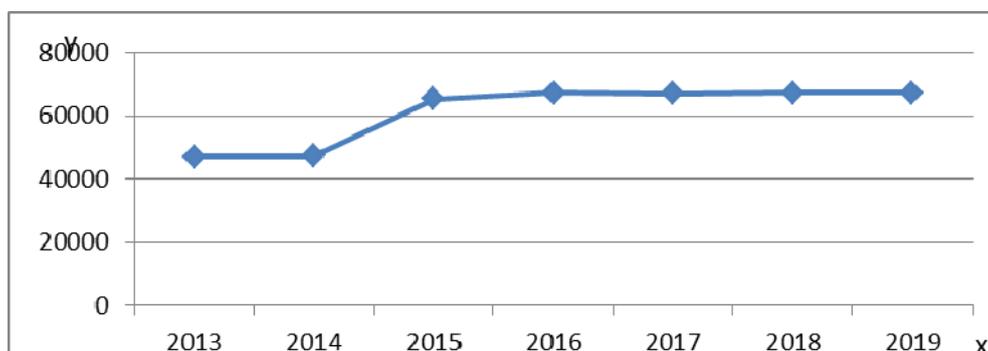


Рис. 1. Смертность населения города Красноярска от болезней пищеварительной системы

Расчет вероятности отклонения маркера ответа от нормы для каждого наблюдения в таблице данных проводится с использованием технологии «скользящего окна».

Для этого каждому наблюдению в таблице данных (каждому значению маркера экспозиции  $x_i$ ) ставится в соответствие оценка вероятности отклонения маркера ответа от нормы ( $p_i$ ), вычисленная для диапазона («скользящего окна») [2]:

$$x_i - \delta < x \leq x_i + \delta. \quad (1)$$

Здесь  $\delta$  – ширина «скользящего окна», которая определяется из соотношения:

Эмпирические значения коэффициентов учитывают как тяжесть клинического течения и исходов заболеваний, так и степень нарушения деятельности функциональных систем организма.

В результате исследования была получена модель рекуррентных соотношений по отдельным системам организма, отражающих влияние отдельных факторов среды обитания на эволюцию риска функциональных нарушений критических систем.

Риск развития нарушений работы пищеварительной системы различной тяжести от воздействия диоксида серы на момент времени  $t$ :

$$R_{t+1}^{PC} = R_t^{PC} + (0.035 \cdot R_t^{PC} + 0.72 \cdot (e^{-0.000106} - e^{-0.000132 \cdot x}) \cdot C \quad (2)$$

Где  $R_{t+1}^{PC}$  – риск нарушений системы организма в момент времени  $t+1$ ;  $R_t^{PC}$  – риск нарушений системы организма в момент времени  $t$ ;  $C$  – временной эмпирический коэффициент, принимаемый в соответствии с табл.3.

В структуре заболеваемости г. Красноярска ведущее место занимают болезни органов дыхания – 376,1 (край – 334,7 случаев на тысячу населения, СФО – 392,5 на 1000 населения, в РФ – 403,2), на втором болезни системы кровообращения – 326,5, на третьем месте болезни пищеварительной системы – 72,9 на тысячу населения.

На основании проведенных вычислений можно сделать вывод о том, что наибольший темп прироста отмечается по классу болезней пищеварительной системы от диоксида серы (93,8 %), в большей степени за счет болезней, характеризующихся онкологическими заболеваниями (уровень заболеваемости увеличился в 2 раза). Заболеваемость онкологическими заболеваниями составляет 35,4 на тысячу населения.

Эта тенденция прослеживается по большинству территорий. В 2016 году по сравнению с 2013 годом увеличились заболевания населения края раком желудка. В течение 2018-2019 гг. наблюдается динамика роста заболеваемости населения злокачественными новообразованиями (темп прироста составил 11,1 %) [3].

### Библиографические ссылки

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» Режим доступа: <https://www.meteo.krasnoyarsk.ru/>
2. Количественная оценка неканцерогенного риска при воздействии химических веществ на основе построения эволюционных моделей / Зайцева Н. В., Шур И. В., Май П. В., Кирьянов Д. А., Атискова Н. Г., Чигвинцев В. М., Цинкер М. Ю., Хрущева Е. В. // М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 36 с.
3. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2018 году, 2019. 302 с.

### References

1. Federal State Budgetary Institution "Central Siberian Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring" Access mode: <https://www.meteo.krasnoyarsk.ru/>
2. Quantitative assessment of non-carcinogenic risk under exposure to chemicals based on the construction of evolutionary models / Zaitseva N. V., Shur I. V., May P. V., Kiryanov D. A., Atiskova N. G., Chigvintsev V. M. , Tsinker M. Yu., Khrushcheva E. V. // M.: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2012. 36 p.
3. State report on the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2018, 2019. 302 p.

© Калиманова Л. С., Тасейко О. В., 2023

УДК 331.45

**УПРАВЛЕНИЕ ОХРАНОЙ ТРУДА  
НА ООО «НОВОАНГАРСКИЙ ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ»**

А. Э. Кононова, О. К. Крылова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Kryilova\_ok@mail.ru

*Управление – непрерывный, целенаправленный циклический процесс воздействия субъекта управления на объект. Цель управления – достижение оптимальных результатов при наименьших затратах времени и ресурсов. Цель управления охраной труда – сохранение жизни и здоровья работников в процессе деятельности.*

*Ключевые слова: управление, охрана труда, предприятие, опасность, здоровье, работники.*

**LABOR PROTECTION MANAGEMENT AT NOVOANGARSKY  
CONCENTRATING PLANT**

A. E. Kononova, O. K. Kryilova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Kryilova\_ok@mail.ru

*Management is a continuous, purposeful cyclic process of impact of the subject of management on the object. The purpose of management is to achieve optimal results with the least expenditure of time and resources. The purpose of labor protection management is to preserve life and health of employees in the process of activity.*

*Keywords: management, labor protection, enterprise, risk, health, employees.*

**Введение.** Новоангарский обогатительный комбинат (НОК) относится к предприятиям горнодобывающей промышленности. Основное направление деятельности НОК – добыча и переработка свинцово-цинковых руд. Горнодобывающая промышленность характеризуется не только наличием значительного количества производственных опасностей, но и существенным загрязнением окружающей среды. На предприятии ООО «НОК» количество работников, занятых во вредных или опасных условиях труда, составляет 73,8% от общей численности. В соответствии с требованиями государственной политики в сфере охраны труда на ООО «НОК» создана служба охраны труда. Управление охраной труда на предприятии является составной частью управления предприятием [1, 2].

Служба охраны труда (СЛОТ) ООО «НОК» напрямую подчиняется директору, согласно организационной структуры предприятия. Прямое подчинение не только подчеркивает значимость СЛОТ, но и сокращает протяженность прямых и обратных связей в управлении. На рисунке 1 показана принципиальная схема структуры системы управления предприятием.

Система состоит из управляющей и управляемой подсистем. Обе эти подсистемы, взаимодействуя, образуют новую систему управления. В любой без исключения системе управления предусмотрены прямые и обратные связи [2, 3].

На ООО «НОК» разработана и доведена до сведения каждого работника Политика в области охраны труда, которая является локальным актом работодателя. Политика в области охраны труда – это публичная декларация работодателя о намерении и гарантированном выполнении им государственных нормативных требований охраны труда и добровольно принятых на себя обязательств. Ежегодно составляется план мероприятий по охране труда, в котором наряду с государственными нормативными

ми требованиями по охране труда учитываются имеющийся передовой опыт, финансовые, производственные возможности предприятия [3, 4].



Рис. 1 Принципиальная схема структуры системы управления

Для наиболее эффективного управления охраной труда на предприятии разработана и внедрена система управления охраной труда (СУОТ), положение о СУОТ. На ООО «НОК» управление охраной труда постоянно совершенствуется и развивается [1,5].

#### Библиографические ссылки

1. Трудовой кодекс Российской Федерации : издание официальное : Москва : Стандартинформ, 2001, 424 с.
2. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 N 776н "Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда"
3. Управление техносферной безопасностью : учебное пособие /Ю. А. Суворова, А. В. Козачек, В. Ю. Богомолов, И. В. и др. //Тамбов : Издательский центр «ТГТУ», 2019. – 80 с.
4. Шабанов Н.И., Орищенко И.В. Управление техносферной безопасностью: учебное пособие. Зерноград.: ДГАУ, 2015. –153 с.
5. Каракеян, В. И., Никулина И. М. Безопасность жизнедеятельности : учебник и практикум для вузов /М.: Издательство Юрайт, 2023. – 313 с.

#### References

1. Labor Code of the Russian Federation : official edition : – Moscow : Standardinform, 2001, 424 с.
2. Order of the Ministry of Labor of Russia from 29.10.2021 N 776n "On Approval of the Approximate Regulations on the labor protection management system" 3. Technosphere safety management : a textbook / Y. A. Suvorova, A. V. Kozachek, V. Y. Bogomolov, I. V. et al. ; //Tambov : Publishing center of FSBEU VO "TSTU", 2019. – 80 с.
4. Shabanov N.I., Orishchenko I.V. Management of technosphere safety: a textbook. manual. Zernograd.: DGAU, 2015. -153 с.
5. Karakeyan, V. I. Life safety : textbook and practical training for universities / V. I. Karakeyan, I. M. Nikulina. – 3rd ed., revision. and supplement. – Moscow : Yurait Publishing House, 2023. – 313

© Кононова А. Э., Крылова О. К., 2023

УДК 331.45

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕХЕ ЛЕСОПЕРЕРАБОТКИ ООО «РОТЕКС-С»

С. Ю. Куваев, О. К. Крылова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Kryilova\_ok@mail.ru

*Безопасность производственных процессов – составная часть безопасности труда. На севере Восточной Сибири велика возможность действия на работников низких температур наружного воздуха. Защита производственных помещений от проникновения холодного воздуха обеспечивает сохранение теплового баланса организма работника с окружающей средой.*

*Ключевые слова: безопасность, производственный процесс, тепловой баланс, тепловая воздушная защита.*

## SAFETY OF PRODUCTION PROCESSES IN THE TIMBER PROCESSING SHOP OF ROTEX-C LTD

S. Y. Kuvaev, O. K. Kryilova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Kryilova\_ok@mail.ru

*Safety of production processes is an integral part of labor safety. It is a great possibility for affecting workers of low outdoor air temperatures in the north of Eastern Siberia. Protection of production facilities from cold air penetration ensures preservation of thermal balance of the employee's organism with the environment.*

*Keywords: safety, production process, heat balance, thermal air protection.*

**Введение.** Производственная площадка ООО «Ротекс-С» располагается на севере Восточной Сибири – в Туруханском районе. Туруханский район относится к холодным районам с резко континентальным климатом – холодная суровая зима (продолжительность 8 месяцев и короткое жаркое лето). Цех лесопереработки является одним из основных структурных подразделений предприятия, осуществляет свою деятельность круглогодично. Технологический процесс цеха характеризуется подачей лесоматериалов и отправлением готовой продукции внутризаводским транспортом, что вызывает необходимость постоянного открывания ворот цеха и поступление наружного воздуха. Обеспечение допустимых микроклиматических условий в цехе является одним из наиболее важных требований обеспечения безопасности производственных процессов [1].

При выполнении производственных процессов в цехе лесопереработки у работников должен сохраняться тепловой баланс организма с окружающей средой. Температура наружного воздуха в районе расположения цеха достигает  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в холодный период года. Для предупреждения нарушения теплового баланса в цехе предлагается установление тепловых завес на воротах для подачи сырья и воротах для вывоза готовой продукции. В работе был выполнен расчет тепловой воздушной завесы, электродвигателей к вентиляторам [2, 3].

Исходные данные: высота ворот цеха  $H_{\text{ВОР}}=4\text{ м.}$ ; ширина ворот  $B_{\text{ВОР}}=3,4\text{ м.}$ ;  $t_{\text{СН}}=-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{ВН}}=+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; разность давлений по высоте:  $\Delta P_{\text{МАХ}}=40\text{ Па}$ , плотность воздуха:  $\rho=1,2\text{ кг/м}^3$ .

Тип завесы: периодически действующая, с боковой двусторонней подачей воздуха. При проведении расчетов были использованы следующие формулы:

Определение разности плотностей воздуха наружного и в помещении

$$\Delta p = 0,005 \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где,  $\Delta t$ -разность температур

Расчет значения давления  $\Delta P$  по высоте  $h$  и находим  $\Delta P$  по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{\text{МАХ}} - \Delta pgh, \quad (2)$$

где,  $g=9,8 \text{ м/с}^2$

Расчетные параметры давления для различной высоты выбраны из таблицы

Принимаем воздушную завесу с наружным воздухозабором, угол между вертикальной плоскостью и направлением выхода струи из щели воздушной завесы составляет  $30^\circ$ . Ширина щели  $b_0$  определяется из условия, что площадь щели составляет 1/30-1/40 площади проема, поэтому применяем формулу:

$$b_0 = \frac{B_{\text{ВОР}} \cdot H_{\text{ВОР}}}{2 \cdot 30 \cdot l_{\text{Щ}}}, \text{ м} \quad (3)$$

где,  $l_{\text{Щ}}$ - высота щели,  $l_{\text{Щ}} = H_{\text{ВОР}} = 4 \text{ м}$ .

Определяем протяженность воздушной струи

$$s = 1,05 \cdot 0,5 \cdot B_{\text{ВОР}}, \text{ м}. \quad (4)$$

Находим  $x$  и  $y$ - координаты точки, через которую проходит ось струи завесы. Для нашего случая:

$$x = 0,5 \cdot B_{\text{ВОР}}, \text{ м}; \quad (5)$$

$$y = 0,12 \text{ м}.$$

Определяем скорость выхода воздуха из щели по формуле

$$V_0 = x \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{2 \cdot b_0 \cdot (x \cdot \text{tg} \alpha - y) \cdot \rho \cdot \cos \alpha}}, \text{ м/с}. \quad (6)$$

Расчетные параметры скорости движения воздуха на разных уровнях представлены выбраны из таблицы.

Находим температуру воздуха, подаваемого в завесу. Разность температур  $\Delta t = t_{\text{ВН}} - t_{\text{СН}} = (15 - (-35)) = 50^\circ \text{С}$ . Определяем  $(t_3 - t_{\text{СН}})$ . Эта разность при  $q=0,7$  ( $q$ -отношение массы воздуха, подаваемого в завесу, кг/ч к массе воздуха, проходящего через ворота, кг/ч, принимается в пределах от 0,6-1,0) равна  $75^\circ \text{С}$ , отсюда  $t_3 = 40^\circ \text{С}$ . До этой температуры следует подогревать воздух, подаваемый в завесу. Расход воздуха на 1 метр длины щели рассчитывается по формуле

$$L = V_{\text{СР}} \cdot b_0 \cdot 1, \text{ м}^3 / (\text{с} \cdot \text{м}). \quad (7)$$

Общий расход воздуха завесы

$$G_3 = 2 \cdot L \cdot l_{\text{Щ}} \cdot 3600 \cdot \rho, \text{ кг/ч}. \quad (8)$$

Затраты тепла на подогрев воздуха

$$Q_3 = C_p \cdot G_3 \cdot (t_3 - t_{\text{ВН}}), \text{ кДж/ч}, \quad (9)$$

где,  $C_p$ - удельная теплоемкость воздуха, равная  $1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

По аэродинамической характеристики вентиляторов подбираем два вентилятора Ц4-70 №8. Производительность  $28000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\eta = 0,6$ ; окружная скорость  $46 \text{ м/с}$ ; давление  $590 \text{ Па}$ , число оборотов  $n=1100 \text{ об/мин}$

Мощность электродвигателя для вентилятора определяется по формуле

$$N_{\text{эд}} = \frac{Q_v \cdot P \cdot K_3}{3,6 \eta_v \eta_n} \cdot 10^{-6}, \quad (10)$$

где,  $Q_v$ - производительность вентилятора,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  $P$ -давление создаваемое вентилятором,  $\text{Па}$ ;  $K_3$ - коэффициент запаса;  $\eta_v$ - КПД вентилятора;

Принимаем 2 двигателя серии А401, мощностью  $8,5 \text{ кВт}$  при  $1000 \text{ об/мин}$ .

По результатам проведенных расчетов и патентных исследований предлагается установить на ворота в цехе лесопереработки две модульные тепловые воздушные завесы для защиты проемов ворот с изменяемым вектором направления воздушной струи и регулируемой шириной щели, что позволит обеспечить безопасность производственных процессов [4, 5].

### Библиографические ссылки

1. Белов, С. В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность) в 2 ч. Часть 1 : учебник для вузов / С. В. Белов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 350 с. Текст : электронный.
2. Каракеян, В. И. Безопасность жизнедеятельности : учебник и практикум для вузов / В. И. Каракеян, И. М. Никулина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 313 с. – (Высшее образование). – Текст : электронный.
3. Крылова О.К. Безопасность труда: учеб. пособие / О.К. Крылова, Н.Г. Черкасова; СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева – Красноярск, 2022 – 76 с. – Текст: непосредственный
4. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 28 декабря 2021 года № 926. Об утверждении рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков: утверждены и введены в действие от 01.03.2022 г. – Москва – Текст: непосредственный
5. Пат. 2716299 Российская Федерация, МПК F24F9/00 СПК F24F2009/005(202/02), F24F2009/005(202/02). Модульная тепловая воздушная завеса для защиты проемов ворот с изменяемым вектором направления воздушной струи и регулируемой шириной щели / ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) № 2019125012; заявл. 07.08.2019; опубл. 10.09.2020, Бюл. № 7. 12 с.

### References

1. Belov, S. V. Life safety and environmental protection (technosphere safety) in 2 parts. Part 1 : textbook for universities / S. V. Belov. – 5th ed., rev. and supplement. – Moscow : Yurait Publishing House, 2023. – 350 p. Text : electronic.
2. Karakeyan, V. I. Life safety : textbook and practice for universities / V. I. Karakeyan, I. M. Nikulina. – 3rd ed., revision. and supplement. – Moscow : Yurait Publishing House, 2023. – 313 p. – (Higher education). – Text : electronic.
3. Krylova, O.K. Labor safety: textbook / O.K. Krylova, N.G. Cherkasova; SibSU named after academician M.F. Reshetnev – Krasnoyarsk, 2022 – 76 p. (Higher education). – Text: direct
4. Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation from December 28, 2021 № 926. On approval of recommendations on the selection of methods for assessing the levels of occupational risks and on reducing the levels of such risks: approved and put into effect from 01.03.2022 – Moscow – Text: direct
5. Pat. 2716299 Russian Federation, MPC F24F9/00 SPC F24F2009/005(202/02), F24F2009/005(202/02). Modular thermal air curtain for protection of gate openings with variable vector of air jet direction and adjustable width of the slot / FGBNU FNAC VIM) No. 2019125012; avt. 07.08.2019; publ. 10.09.2020, Bulletin No. 7. 12 p.

© Куваев С. Ю., Крылова О. К., 2023

УДК614.777:628.316.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ Г. КРАСНОЯРСКА

П. В. Лагно, Н. Г. Черкасова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 5hat@bk.ru

*В работе определен качественный состав органических и неорганических токсикантов в составе иловых отложений очистных сооружений г. Красноярск.*

*Ключевые слова: осадки сточных вод; очистные сооружения; токсичные вещества, активный ил.*

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SILT DEPOSITS OF TREATMENT FACILITIES IN KRASNOYARSK

P.V. Lagno, N. G. Cherkasova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 5hat@bk.ru

*The qualitative composition of organic and inorganic toxicants in the composition of silt deposits of treatment facilities in Krasnoyarsk is determined in the work.*

*Keywords: sewage sludge; sewage treatment plants; toxic substances, activated sludge.*

Иловые площадки являются одними из первых сооружений обработки осадка сточных вод (ОСВ), они предназначены для естественного обезвоживания осадков, образующихся на станциях биологической очистки сточной воды. Однако даже в эпоху интенсивного внедрения сооружений механического обезвоживания осадка, иловые площадки являются самым распространенным в России методом обезвоживания осадка. В настоящее время на иловых площадках обрабатывается 90% всего осадка, образующегося в России [1]. Привлекательность этих сооружений объясняется простотой инженерного обеспечения и легкостью эксплуатации по сравнению с фильтр-прессами, вакуум-фильтрами, сушильными установками. Складируемый осадок заражен опасными бактериями, способными вызвать различные формы инфекционных заболеваний, содержит большое количество яиц гельминтов, соединения тяжелых металлов различной формы [2].

Основным направлением использования обезвоженных осадков сточных вод является применение их в качестве удобрений. Однако, в основном из-за высокой насыщенности ионами тяжелых металлов, поступающих со сточными водами промышленных предприятий, использование осадков в сельском хозяйстве весьма ограничено, а часто вообще невозможно. Поэтому подсушенные ОСВ остаются на иловых картах, занимая площади, необходимые для полноценного обезвоживания вновь образующихся на очистных сооружениях осадков. Такое положение со временем приводит к сокращению свободных площадей иловых карт. Для вновь образующегося осадка требуется отчуждение все новых и новых территорий. Преимущественно эти земли находятся в городской черте.

Только в Красноярске общий размер иловых полей левого (ЛОС) и правого (ПОС) берега составляет 1,457 тыс. кв. м., а средний резерв заполнения – 30% [3]. На очистные сооружения ПОС и ЛОС поступает смесь производственных и хозяйственных бытовых сточных вод в определенных соотношениях, см. рис. 1.

Эксплуатация иловых карт приводит к потере ценнейших земель, загрязнению почвы, распространению неприятных запахов, накоплению солей тяжелых металлов, а также к распространению не-

гативного микробиологического и газового фона, который отрицательно влияет на состояние окружающей среды и здоровье человека. В связи с этим возникает необходимость снижения количества иловых карт, за счет внедрения специализированного оборудования [4].

Химический состав стоков указанных производств, по литературным данным, может быть представлен минимальным количеством токсичных органических веществ, в основном это металлы, нефтепродукты и жиры [5].

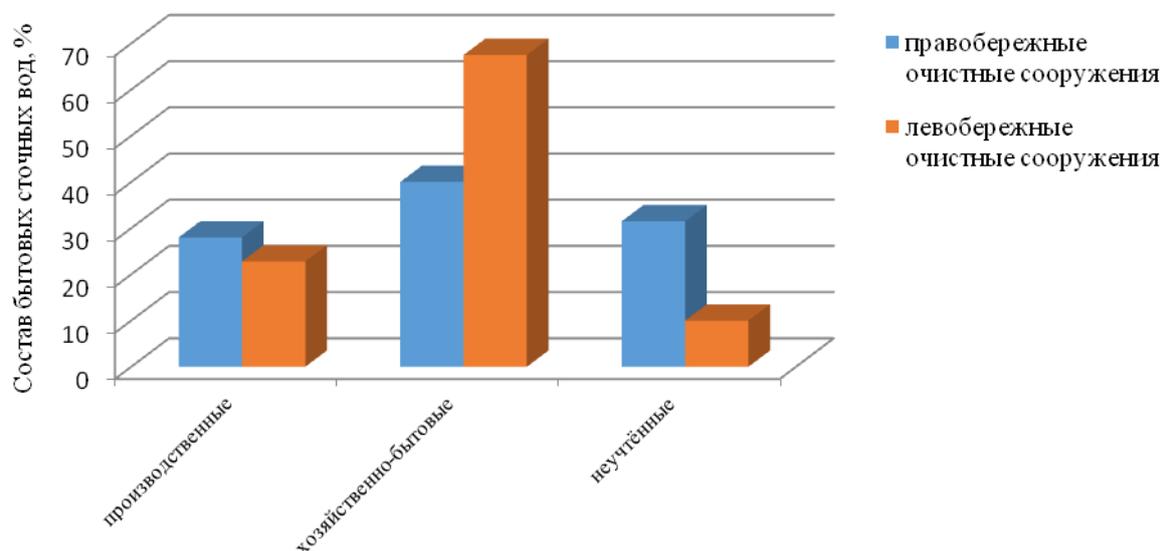


Рисунок 1 – Состав бытовых сточных вод о видам стоков

Характеристика сброса отдельных загрязняющих веществ в водные объекты выражена в определении вида и количества основных сбрасываемых веществ за 2021-2022 год, данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристика сброса загрязняющих веществ в Красноярском крае в 2021-2022 г.**

Наименование загрязняющих веществ	Масса сброса, т		Масса сброса в пределах установленных нормативов (лимитов), т		Масса сброса сверх установленных нормативов (лимитов), т	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Азот аммонийный	0	0	0	0	0	0
Алюминий	2,2	2,0	9,3	7,6	0	0
Взвешенные вещества	13 462,5	18 022,4	5 958,1	6 436,8	7 395,2	0
Железо (Fe+2, Fe+3)	51,8	45,3	179,7	142,4	0	0
Марганец (Mn2+)	6,6	6,5	23,4	9,3	0,8	0,2
Медь (Cu2+)	0,8	0,7	1,7	1,3	0	0
Нефть и нефтепродукты	20,1	17,5	40,9	27,8	0	0
Фенол	0,4	0,4	0,8	1,3	0	0
Формальдегид	2,1	2,1	3,2	3,1	0	0
Фторид анион	16,0	12,6	27,9	26,2	0	0
Хлориды (Cl-)	42,4	33,9	51,0	97,2	0	0
Цинк (Zn2+)	4,6	4,5	5,3	4,5	0	0,5

Разработка технологии утилизации ила очистных сооружений невозможна без комплексного исследования его состава и токсичности. Выполнено тестирование токсичности активного ила с помощью культурных растений. Проведено сравнение способов расчета класса опасности отходов, что позволило дать рекомендации по их совершенствованию и установить классы опасности ила.

Прогнозирование поведения органических веществ в окружающей среде под действием физико-химических и микробиологических факторов является трудной задачей, поэтому нуждается в разработке методических подходов к выбору приоритетных токсикантов в иловых отложениях, а также методы их контроля. Все это позволит выбрать наиболее эффективный способ переработки ила очистных сооружений.

#### Библиографические ссылки

1. Томилина И.И. Определение качества донных отложений водохранилищ Верхней Волги методами биотестирования // Новые технологии в защите биоразнообразия в водных экосистемах: Тез. докл. Междунар. конф. 27-29 мая 2002 г. М.: Б.И., 2002. С. 184.
2. Хансен Б., Пииртола Л. Использование осадка в качестве источника сырья и энергии // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. №4. С. 36-38.
3. Н. Бабейова Н.О., Главати О.Л. Экологические последствия загрязнения кадмием грунтов и почвенных вод: Обзор // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2001. №1. С. 39-48.
4. Вьюгина Г.В. Изучение содержания токсических веществ в почве методом биологических тестов // Проблемы разработки региональной модели устойчивого развития: Мат. н.-п. конф. 26-28 мая 1997 г. Смоленск, 1997. С. 441-443.
5. Кармазинов Ф.В., Пробрский М.Д. Технологический комплекс по обработке и утилизации осадков сточных вод на ЦСА Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. №8. С. 2-7.

#### References

1. Tomilina I.I. Determination of the quality of bottom sediments of reservoirs of the Upper Volga by biotesting methods // New technologies in the protection of biodiversity in aquatic ecosystems: Tez. dokl. International Conference May 27-29, 2002, Moscow: B.I., 2002. p. 184.
2. Hansen B., Piirtola L. The use of sediment as a source of raw materials and energy // Water supply and sanitary engineering. 2001. No. 4. pp. 36-38.
3. N. Babikova N.O., Glavati O.L. Ecological consequences of cadmium pollution of soils and soil waters: Overview // Ecotechnologies and resource conservation. 2001. No. 1. pp. 39-48.
4. Vyugina G.V. Studying the content of toxic substances in the soil by the method of biological tests // Problems of developing a regional model of sustainable development: Mat. n.-P. conf. 26-28 May 1997 Smolensk, 1997. pp. 441-443.
5. Karmazinov F.V., Probrsky M.D. Technological complex for the treatment and disposal of sewage sludge on CSA of St. Petersburg // Water supply and sanitary equipment. 2001. No. 8. pp. 2-7.

© Лагно П. В., Черкасова Н. Г., 2023

УДК 504.055

**ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРИ РАБОТЕ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ООО «СОЮЗ»**

Ю. С. Ларичева, Е. Н. Бельская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: volnushka24@mail.ru

*В работе представлены результаты измерений уровней звукового давления в октавных полосах частот, при эксплуатации деревообрабатывающего оборудования. Проведён анализ соответствия полученных значений установленным нормативам.*

*Ключевые слова: шум, спектр шума, деревообрабатывающие станки, рейсмус.*

**STUDY OF NOISE CHARACTERISTICS DURING THE OPERATION  
OF WOODWORKING EQUIPMENT LLC "SOYUZ"**

Yu. S. Laricheva, E. N. Belskaia

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: volnushka24@mail.ru

*The paper presents the results of measurements of sound pressure levels in octave frequency bands, during the operation of woodworking equipment and analysis of the compliance of the obtained values with the established standards.*

*Keywords: noise, noise spectrum, woodworking machines, reismus.*

При эксплуатации современного высокопроизводительного деревообрабатывающего оборудования возникают значительные вибрации и шумы [1,2]. Характеристикой постоянного шума на рабочих местах являются уровни звукового давления в октавных полосах частот, со среднегеометрическими значениями: 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц [3,4]. В работе проведен анализ октавных уровней звукового давления (УЗД) на рабочих местах операторов деревообрабатывающих станков (торцовочного ТС – 420, Россия, 2010г. и рейсмусного Pinheiro PMC5 – 450, Италия, 1997г.) предприятия ООО «СОЮЗ».

Измерения уровней шумовых воздействий проводились с использованием шумомера – анализатора спектра ОКТАВА-110А (с усилителем Р-200 и микрофоном МК-265). Шумомер – анализатор предназначен для измерения среднеквадратичных, эквивалентных и пиковых уровней звука, октавных и третьоктавных уровней звукового давления (УЗД), с целью оценки его влияния на человека и определения акустических характеристик механизмов и машин. Результаты измерения показали различия в формировании спектрального состава шума для исследуемых станков, что характерно как для холостого хода, так и при обработке пиломатериалов.

На рисунке 1 приведены полученные экспериментальные данные УЗД в октавных полосах частот торцовочного станка ТС – 420, используемого для поперечной распиловки пиломатериалов, на холостом ходу и под нагрузкой, а также предельно допустимые значения УЗД, согласно СП 51.13330.2011 [3].

Даже на холостом ходу, по результатам измерений на торцовочном станке, шумовое давление значительно превышает (до 11 Дб) предельно допустимые значения в диапазоне от 250 до 8000 Гц. При работе под нагрузкой превышение допустимых значений достигает 23 Дб в диапазоне от 125 до 8000 Гц.

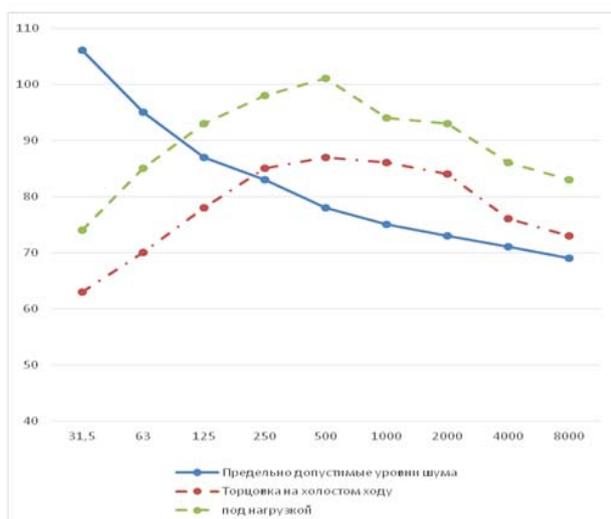


Рис. 1 УЗД в октавных полосах частот, при работе ТС – 420

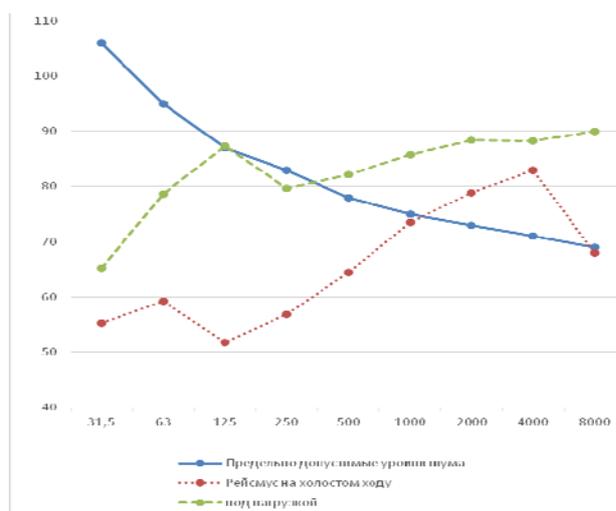


Рис. 2 УЗД в октавных полосах частот, при работе Pinheiro PMC5 – 450

Результаты измерений уровней звукового давления, при работе рейсмусного станка Pinheiro PMC5 – 450, используемого для продольного строгания пиломатериалов, на холостом ходу демонстрируют достаточно низкие показатели в 50-60 дБ в диапазоне вплоть до 1000 Гц. Далее идет пиковое превышение предельно допустимых значений в диапазоне 2000-4000 Гц и резкое снижение шумового давления. Следует отметить, что на данном станке использована оригинальная компоновка приводов ножевых валов, защитного кожуха и использованы дополнительные материалы шумопоглощения. Очевидно, что эти решения способствовали снижению уровней шумового воздействия, однако при частотах выше 1000 Гц наблюдается превышение предельно допустимой нормы на 4 – 21 дБ.

Также в работе определен эквивалентный уровень звука А на рабочем месте оператора, наибольшие значения, из рассмотренного оборудования, наблюдались при работе торцовочного станка ТС – 420 и составили 93 дБА. Предельно-допустимые эквивалентные уровни звука на рабочих местах, составляют 80 дБА, очевидно, что необходимо снижение уровней воздействия. Наиболее целесообразным методом снижения шума в цехах деревообрабатывающих предприятий является совершенствование конструкций станков [4].

Однако, проведенное исследование показывает, что этого недостаточно и операторам, работающим на станках необходимо минимизировать возможные негативные последствия путём выполнения следующих мероприятий [5]: информирование и обучение работающего таким режимам работы с оборудованием, которое обеспечивает минимальные уровни генерирующего шума; использование необходимых технических средств (защитные экраны, кожухи, звукопоглощающие покрытия, изоляция, амортизация); ограничение продолжительности и интенсивности воздействия до уровней приемлемого риска; обязательное предоставление работающим средств индивидуальной защиты органов слуха (наушники, шлемофоны, с акустической эффективностью не менее 25 дБ); ежегодное проведение медицинских осмотров для операторов станков.

### Библиографические ссылки

1. Месхи Б.Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих и деревообрабатывающих станков за счёт снижения шума в рабочей зоне (теория и практика)/ Б.Ч. Месхи. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГРУ, 2003. – 131 с.
2. Месхи Б.Ч., Виноградов И.С. Экспериментальные исследования спектров шума в рабочей зоне круглопильных деревообрабатывающих станков. Вестник ДГРУ, 2010. Т.10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-spektrov-shuma-v-rabochey-zone-kruglopilnyh-derevoobrabatyvayuschih-stankov/viewer> (дата обращения: 15.08.2023).
3. СП 51.13330.2011 Защита от шума. свод правил : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 28 декабря 2010 г. N 825 и введен в действие с 20 мая 2011 г. : введен впервые / разработан Научно-

исследовательским институтом строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук – Москва: Минрегион России, 2010. – Текст : непосредственный.

4. ГОСТ 12.2.026.0-2015 Оборудование деревообрабатывающее. Требования безопасности к конструкции : издание официальное : введен в действие 01.01.2017 г. взамен ГОСТ 12.2.026.0 – 83; Москва: СтандартИнформ, 2016. – Текст : непосредственный.

5. СанПиН 2.2.4.3359-16 [4] «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», раздела III «Шум на рабочих местах» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://02.rospotrebnadzor.ru/content/174/35245/> (дата обращения: 15.08.2023).

### References

1. Meskhi B.Ch. Uluchsheniye usloviy truda operatorov metallorezhushchikh i derevoobrabatyvayushchikh stankov za schot snizheniya shuma v rabochey zone (teoriya i praktika) [Improving the working conditions of operators of metal-cutting and woodworking machines by reducing noise in the working area (theory and practice) ] / B.Ch. Meskhi. – Rostov-on-Don: DGRU Publishing Center, 2003. – 131 p.

2. Meskhi B.Ch., Vinogradov I.S. Eksperimental'nyye issledovaniya spektrov shuma v rabochey zone kruglopil'nykh derevoobrabatyvayushchikh stankov. [Experimental studies of noise spectra in the working area of circular sawing machines.] Vestnik DGRU, 2010. T.10. [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-spektrov-shuma-v-rabochey-zone-kruglopilnyh-derevoobrabatyvayushchih-stankov/viewer> (accessed: 15.08.2023).

3. SP 51.13330.2011 Zashchita ot shuma. svod pravil : izdaniye ofitsial'noye : utverzhen i vveden v deystviye prikazom Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii ot 28 dekabrya 2010 g. N 825 i vveden v deystviye s 20 maya 2011 g. [Noise protection. set of rules: official edition: approved and put into effect by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation of December 28, 2010 N 825 and put into effect on May 20, 2011]: introduced for the first time / developed by the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences – Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2010. – Text: immediate.

4. GOST 12.2.026.0-2015 Oborudovaniye derevoobrabatyvayushcheye. Trebovaniya bezopasnosti k konstruksii : izdaniye ofitsial'noye : vveden v deystviye 01.01.2017 g. vzamen GOST 12.2.026.0 – 83 [Woodworking equipment. Safety requirements for the design: official edition: put into effect on 01.01.2017 instead of GOST 12.2.026.0 – 83]; Moscow: StandartInform, 2016. – Text: immediate.

5. SanPiN 2.2.4.3359-16 [4] «Sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochikh mestakh», razdela III «Shum na rabochikh mestakh» ["Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace", section III "Noise in the workplace"] [Electronic resource]. Available at: <https://02.rospotrebnadzor.ru/content/174/35245/> (accessed: 15.08.2023).

© Ларичева Ю. С., Бельская Е. Н., 2023

УДК 622.276.72

## БИОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Н. И. Макара, С. В. Соболева, О. А. Есякова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: swet.soboleva2011@yandex.ru

*В работе рассмотрено загрязнение почвенного покрова нефтепродуктами и биологические методы очистки почв от загрязнений с использованием биосорбента «Biteoil».*

*Ключевые слова: нефтезагрязненные почвы, уровень загрязнения, метод микробиологической очистки.*

## BIOLOGICAL METHOD OF CLEANING SOIL POLLUTION FROM PETROLEUM PRODUCTS

N. I. Makar, S. V. Soboleva, O. A. Esiakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: swet.soboleva2011@yandex.ru

*The paper considers the contamination of the soil cover with petroleum products and biological methods of soil purification from pollution using the biosorbent "Biteoil".*

*Keywords: oil-contaminated soils, the level of pollution, the method of microbiological purification.*

Цель работы заключается в изучении загрязнения почвенного покрова нефтепродуктами и использование биологических методов очистки почв от загрязнений.

Нефтехимическое загрязнение в настоящее время представляет опасность для окружающей среды вследствие длительного разложения нефти в почве [1]. Существующие на сегодняшний день препараты не справляются с возрастающим загрязнением. Существующие на сегодняшний день сорбенты для ликвидации аварийных разливов нефти требуют сбора после применения, из-за чего их применение в труднодоступных, обводненных и заболоченных местах существенно ограничено [2]. В отличие от них разработанный ООО «НИИ Транснефть» биосорбент «Biteoil» представляет собой подобранный консорциум микроорганизмов-нефтедеструкторов (биоагент), нанесённый на торфоминеральный субстрат. Биосорбент «Biteoil» не требует сбора после использования, он слабо чувствителен к обеспеченности кислородом, что позволяет рекомендовать его для применения на обводнённых (в том числе болотистых) и тяжелых (глины и суглинки) почвах, сохраняет сорбционные свойства при отрицательных температурах и восстанавливает биодеструктивную способность после зимнего периода [3]. Объектом исследования служили почвогрунты в районе нефтепровода Куюмба-Тайшет. Пробы отбирали послойно с глубины 0–5 и 5–20 см с таким расчетом, чтобы каждая представляла собой часть, типичную для генетических горизонтов или слоев данного типа почвы.

Пробы почвы для химического анализа высушивали до воздушно-сухого состояния по методу, описанному в ГОСТ 17.4.4.02. Удаляли механические включения, измельчали в фарфоровой ступке, просеивали через сито. Для определения количества и идентификации загрязнения почв нефтепродуктами использовали экспресс-метод ИК-спектроскопии [3]. Отбор проб проводили один раз в 6 месяцев в двухкратной повторности. Для очистки почвы от нефтепродуктов использовали «Биосорбент «Biteoil», на который получено положительное заключение ООО «НИИ Транснефть». № 60. от 29.01.2020. Он представляет собой консорциум микроорганизмов-нефтедеструкторов, нанесённый на

торфоминеральный субстрат. Он не требует сбора после использования, может применяться на обводнённых и тяжелых почвах. В условиях полевых экспериментов применение биосорбента «Biteoil» за 4 – 6 месяцев при устойчивых положительных температурах позволило снизить в несколько раз концентрацию нефтепродуктов в почве [4-5]. Его эффективность в условиях полевых экспериментов оказалась в 10 раз выше, чем у промышленно выпускаемых сегодня биопрепаратов [6-8]. При проведении полевого эксперимента в условиях вечной мерзлоты руководствовались руководящими документами предприятия ООО «Трансфетфть- Восток» [9]. По результатам анализа до и после применения биосорбента выяснили, что состояние почв удовлетворительное: по нефтепродуктам – от 82,4 до 202,7 мг/кг. По степени засоления почвы в районе отбора проб на месторождении Куюмба относятся к категории средnezасоленные –0,14 ммоль/100 г (хлориды). Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты анализа проб почвы на нефтепродукты до и после обработки Биосорбент «Biteoil»**

№ п/п	Место отбора пробы	Результат до начала работ, мг/кг	Результат после окончания работ, мг/кг
1	ГНПС «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов	218,9	124,0
2	ГНПС «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов	182,2	82,4
3	ГНПС «Куюмба» камера СОД	497,2	202,7
4	ГНПС «Куюмба» площадка ремонта	215,8	180,0
5	НПС-2, камера СОД	645,0	192,7
6	НПС-3, камера СОД	692,0	195,9
7	НПС-4, камера СОД	355,6	190,3
8	ГНПС «Тайшет», камера СОД	408,6	186,4
9	ГНПС «Тайшет» (ВСТО)	395,5	165,4

В процессе работы изучили биологические методы ликвидации загрязнений нефтепродуктов и выяснили, что наиболее эффективным деструктором нефти является биосорбент «Biteoil». Преимуществом биопрепарата является высокая степень очистки почв и грунтов от нефти и нефтепродуктов (на 67-78%) в условиях климата Восточной Сибири за короткий промежуток времени (60 суток). По результатам испытаний на месторождении Куюмба на предмет загрязнения почвы нефтепродуктами выяснили, что биосорбент «Biteoil» является эффективным деструктором нефти и может быть успешно использован для очистки почвы от нефтяных загрязнений.

**Библиографические ссылки**

1. Н.В. Макара, С.В. Соболева, В.М. Воронин. Исследование загрязнения почвенного покрова при добыче и транспортировке товарной нефти Решетневские чтения/Материалы XXVI международной научно-практич. конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (9-11 ноября 2022, г.Красноярск).- СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Ч.1., С. 778-780.
2. Полякова, С. А. Анализ аварийности на объектах нефтегазовой отрасли России / С. А. Полякова, С. С. Ильичёв// Молодой ученый. – 2022. – № 16 (411). – С. 115-117.
3. ГОСТ Р 54039-2010 Качество почв. Экспресс-метод ИК-спектроскопии для определения количества и идентификации загрязнения почв нефтепродуктами.
4. Другов Ю.С. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. Практическое руководство: 2-е изд., перераб. И доп./ Ю.С. Другов, А.А. Родин. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012, – 270 с.
5. Технология ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на воде и почве с использованием биосорбента и биопрепарата, разработанных ООО «НИИ Транснефть» / С. А. Половков [и др.] // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. М., 2017. С. 72–74.

6. Пат. 2738482 Российская Федерация, МПК В09С 1/10 Способ рекультивации почвы, загрязненной нефтью и нефтепродуктами / Смирнов Ю.Д.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербурга горный университет». - № 2020121324; заявил. 20.06.2020; опубл. 14.12.2021 Бюл. № 35.- 12 с.

7. Пат. 2618096 Российская Федерация, МПК В09С 1/00 Способ фиторемедиации почвы, загрязненной углеводородами, и применение штамма микроорганизма *Rhodococcus erythropolis* ВКМ Ас-2017Д в качестве стимулятора роста растений / Отрошко Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГУ». – № 2016122777; заявил. 08.06.2016; опубл. 02.05.2017 Бюл. № 16.- 9 с.

8. Пат. 2744094 Российская Федерация, МПК А01N 63/20 Микробный препарат для защиты растений, произрастающих на нефтезагрязненных почвах / Третьякова М.С.; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Сибирский институт физиологии и биохимии растений». – № 2020124773; заявил. 16.07.2020; опубл. 02.03.2021 Бюл. № 7. -15 с.

9. ОР-13.020.30-КТН-138-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Производственный эколого-аналитический контроль за состоянием компонентов окружающей среды. Порядок планирования и организации работ.-79 с.

### References

1. N.V. Makar, S.V. Soboleva, V.M. Voronin. Investigation of soil contamination during the extraction and transportation of commercial oil Reshetnev readings/Materials of the XXVI International Scientific and practical conference dedicated to the memory of the General designer of rocket and space systems Academician M.F. Reshetnev (November 9-11, 2022, Krasnoyarsk).- SibGU named after M.F. Reshetnev, Part 1., pp. 778-780.

2. Polyakova, S. A. Accident analysis at the facilities of the oil and gas industry of Russia / S. A. Polyakova, S. S. Ilyichev// Young Scientist. – 2022. – № 16 (411). – Pp. 115-117.

3. GOST R 54039-2010 Soil quality. Express method of IR spectroscopy for determining the amount and identification of soil contamination with petroleum products.

4. Drugov Yu.S. Environmental analyses during oil and petroleum product spills. Practical guide: 2nd ed., reprint. And additional/ Y.S. Drugov, A.A. Rodin. – M.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2012, – 270 p.

5. Technology for the elimination of oil and oil products spills on water and soil using a biosorbent and a biological product developed by Transneft Research Institute LLC / S. A. Polovkov [et al.] // Collection of works of laureates of the International Competition of Scientific, Scientific, technical and innovative developments aimed at the development and development of the Arctic and the continental shelf., 2017. С. 72-74.

6. Pat. 2738482 Russian Federation, IPC B09C 1/10 Method of recultivation of soil contaminated with oil and petroleum products / Smirnov Yu.D.; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg Mining University". – No. 2020121324; declared. 20.06.2020; publ. 14.12.2021 Byul. No. 35.- 12 p.

7. Pat. 2618096 Russian Federation, IPC B09C 1/00 method of phytoremediation of soil contaminated with hydrocarbons and the use of a strain of the microorganism *Rhodococcus erythropolis* VKM As-2017D as a plant growth stimulator / Otroshko D.N.; applicant and patent holder of FGBOU VO "KubGU". – No. 2016122777; declared. 08.06.2016; publ. 02.05.2017 Byul. No. 16.- 9 p .

8. Pat. 2744094 Russian Federation, IPC A01N 63/20 Microbial preparation for the protection of plants growing on oil-contaminated soils / Tretyakova M.S.; applicant and patent holder of the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry. – No. 2020124773; declared. 16.07.2020; publ. 02.03.2021 Byul. No. 7. -15 p.

9. OR-13.020.30-КТН-138-14 Main pipeline transportation of oil and petroleum products. Industrial ecological and analytical control over the state of environmental components. The order of planning and organization of work.-79 p .

© Макаров Н. И., Соболева С. В., Есякова О. А., 2023

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТСТОЙКОСТИ В ТЕЛЛУРИДЕ КАДМИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. В. Мозжерин<sup>1</sup>, Н. Н. Паклин<sup>1</sup>, Ю. Ю. Логинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.  
E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: loginov@sibsau.ru

*Методами компьютерного моделирования изучено влияния кратковременной импульсной тепловодозы до 1000°C, возникающей в зонах теплового воздействия техногенных пожаров переменной интенсивности на полупроводниковые тонкопленочные образцы теллурида кадмия, используемых в разнообразных приборах и устройствах космической техники. Установлены отдельные особенности образования точечных структурных дефектов, их влияние на границы применимости и время работы оборудования.*

*Ключевые слова: теллурид кадмия, структурные дефекты, численное моделирование, импульсное тепловое воздействие.*

## NUMERICAL SIMULATION OF DEFECT RESISTANCE IN CADMIUM TELLURIDE UNDER PULSE HEAT EXPOSURE

A. V. Mozzherin<sup>1</sup>, N. N. Paklin<sup>1</sup>, Y. Y. Loginov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodnii pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: loginov@sibsau.ru

*Using computer research, we studied the considered pulsed heat dose up to 1000°C, which occurs in zones of thermal influence of man-made fires of variable power on semiconductor thin-film cadmium telluride cores, used in modest instruments and devices of spacecraft. Additional features of the formation of precise structural defects, their influence on boundary penetration and equipment operating time have been established.*

*Keywords: cadmium telluride, structural defects, numerical modeling, pulsed thermal effect.*

Активное использование в ракетно-космической отрасли полупроводниковых материалов значительно увеличивается. Одним из интересных и перспективных материалов в этой сфере является бинарное химическое соединение теллурид кадмия (CdTe) входящее в группу полупроводников A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> [1]. При этом случаются ситуации чрезвычайных событий, например возгораний, когда приборы и устройства испытывают тепловое воздействие значительно превышающее допустимое. Подобные экстремальные условия нередко сопровождаются значительной кратковременной тепловодозой до 1000°C в результате воздействия которой материал начинает деградировать, а оборудование работать некорректно и выходить из строя.

Исследовательская часть работы включала усовершенствованную модель физико-химических превращений в образцах CdTe под действием импульсной кратковременной тепловодозы на основе группы модифицированных уравнений эволюции концентраций структурных точечных дефектов [2-3]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = P + D_i \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - c_0 R n v - 2c_0 A_i n^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = P + D_V \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - c_0 R n v - 2c_0 A_V v^2 \quad (2)$$

Где,  $n = C_1/c_0$ ,  $v = C_v/c_0$ ,  $t$  – время;  $c_0$  – концентрация узлов теллурида кадмия;  $C_1$  и  $C_v$  – эффективные концентрации междоузельных атомов и вакансий;  $D_1$  и  $D_v$  – коэффициенты диффузии (миграции) междоузельных атомов и вакансий;  $A_1$  и  $A_v$  – коэффициенты агломерации (присоединения) междоузельных атомов и вакансий, соответственно;  $R$  – коэффициент рекомбинации,  $P$  – коэффициент диссоциации решетки кристалла, отвечающий эффективной энергии теплового рождения пар Френкеля  $E_p$ .

Решение уравнений (1) – (2) представлены на рис. 1.

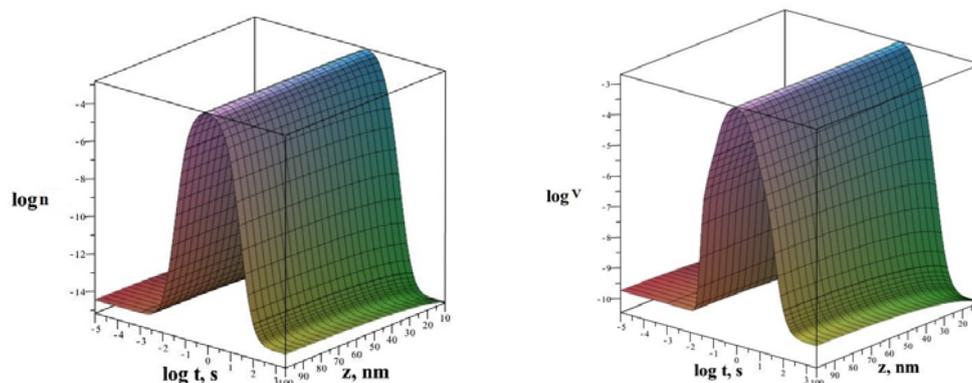


Рисунок 1. Концентрации точечных дефектов (вакансий и междоузлий) при резком кратковременном тепловом воздействии  $\sim 1000$  °C

Здесь показаны десятичные логарифмы времени в секундах и относительных концентраций междоузлий и вакансий  $n$ ,  $v$ ,  $c_0 = 10^{22}$  см<sup>-3</sup>, а шкала  $z$  линейная – это полутолщина пленки в нанометрах.

Функции зависят от времени и расстояния от поверхности до центра пленки:  $n(z, t)$ ,

$v(z, t)$ . Граничные условия:  $n(0, t) = v(0, t) = 0$ ,  $dn/dz = 0$ ,  $dv/dz = 0$  при  $z = 100$ . Начальные условия неоднородные и отвечают равновесному распределению точечных дефектов при температуре  $T = 300$  K, а концентрации точечных дефектов пропорциональны функции  $\sim z(z - 200)$ .

На образец действует тепловой импульс, в результате которого температура описывается формулой  $T = 300 + A \cdot \exp(-t^2)$ . На рис. 1-2 амплитуда импульса равна  $A \sim 1000$  °C градусов, т.е. в максимуме температура достигает температуры плавления. После такого теплового воздействия, пленка CdTe толщиной 200 нм приходит в равновесное состояние за 5 минут.

Проведенное комплексное моделирование дефектообразования в теллуриде кадмия в условиях кратковременного импульсного теплового действия, имитирующего зону теплового воздействия техногенного пожара  $\sim 1000$ °C показало устойчивость тонкопленочного полупроводника, но только до температур в 400-500°C, что даёт небольшой временной запас до начала ликвидации пожара и приемлемую работу оборудования в экстремальной среде ограниченное время.

### Библиографические ссылки

1. Логинов, Ю.Ю. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках  $A_2B_6$ : науч. изд. / Ю. Ю. Логинов, Браун Пол Д., Дьюроуз Кен. – М.: Логос, 2003. – 304 с.
2. Мозжерин А.В., Паклин Н.Н. Теплоустойчивость теллурида кадмия в инфракрасных детекторах для мониторинга пожарной обстановки. Безопасность техногенных и природных систем. 2023;(3):7-13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-7-13>
3. Горичок, И. В. Энтальпия образования дефектов Шоттки в полупроводниках / И. В. Горичок // ФТТ. – 2012. Том 54 – вып. 3. – С. 1373–1376.

### References

1. Loginov Y, Brown P, Durose K. The Regularities of Structural Defect Formation in Semiconductors II–VI (Logos, Moscow, 2003)
2. Mozzherin A.V., Paklin N.N. Thermal stability of cadmium telluride in infrared detectors for fire protection. Technological and security systems. 2023;(3):7-13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-7-13>
3. Gorichok, I.V. Enthalpy of formation of Schottky defects in semiconductors / I.V. Gorichok // FTT. – 2012. Volume 54 – issue. 3. – pp. 1373–1376.

УДК 351.821

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ

М. Г. Нестерова, Е. А. Жирнова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ngo59@mail.ru

*Исследуются вопросы разработки программы обеспечения безопасности климатической камеры.*

*Ключевые слова: безопасность, программа обеспечения безопасности, опасные производственные факторы, вредные производственные факторы.*

## ENSURING THE SAFETY OF OPERATION OF THE CLIMATE CHAMBER

M. G. Nesterova, E. A. Zhirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ngo59@mail.ru

*The issues of developing a program to ensure the safety of the climate chamber are being investigated.*

*Keywords: safety, security program, dangerous production factor, harmful production factor.*

Для обеспечения безопасности эксплуатации камеры разрабатывается программа обеспечения безопасности. Программа обеспечения безопасности – это организационно-технический документ, содержащий перечень работ и мероприятий, проводимых на всех стадиях создания и эксплуатации комплекса и направленных на реализацию и контроль выполнения заданных требований по обеспечению безопасности.

Основной задачей программы обеспечения безопасности является определение объема организационно-технических мероприятий и исполнителей работ по реализации указанных мероприятий, обеспечивающих безопасность эксплуатации оборудования.

Рассмотрим разработку программы обеспечения безопасности для климатической камеры. Климатическая камера предназначена для проведения климатических испытаний, позволяет моделировать агрессивное воздействие окружающей среды на объекты. Климатическую камеру можно использовать для максимального приближения к реальным условиям работы с помощью моделирования окружающей среды, и исследовать воздействие параметров (температуры, влажности) на оборудование.

Для предотвращения появления угрозы жизни и здоровью человека и сохранности оборудования, необходимо разработать программу обеспечения безопасности при проведении испытаний в климатической камере.

Анализ требований к конструкции показывает, что камера должна обеспечивать защиту обслуживающего персонала и окружающей природной среды, в том числе и в случае возникновения внештатных ситуаций, при выполнении заданных функций с учётом требований ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы» и действующей нормативной документации по следующим видам опасных и вредных факторов: пожароопасности; взрывоопасности; электрической опасности; механической опасности; тепловой опасности; статического электричества; ошибочных действий обслуживающего персонала.

Оборудование, в том числе и его составные части, должны удовлетворять требованиям безопасности, установленными федеральными законами от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», а также ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» [1-3].

Выполнение требований по обеспечению безопасности эксплуатации климатической камеры требует разработать комплекс мероприятий по безопасности.

Основные процессы обеспечения безопасности представлены на рис. 1.



Рис. 1 – Основные процессы обеспечения безопасности

Безопасность эксплуатации климатической камеры достигается следующим, во-первых, высокой надежностью функционирования составных частей климатической камеры и созданием обоснованных запасов их работоспособности, во-вторых, наличием у покупных комплектующих изделий сер-

тификатов соответствия требованиям безопасности, в-третьих, исключением применения как внутри камеры тепла и холода с мониторингом влажности, так и снаружи пылящих материалов (стеклоткани, войлок и т. п.), материалов, содержащих поливинилхлориды (пластикаты, изоленды и т. п.), серосодержащих резин и других материалов, выделяющих вредные вещества для человека, в-четвёртых, проведением анализа нештатных ситуаций и аварийных ситуаций и разработке мероприятий по их предупреждению и устранению.

Таким образом, разработка программы обеспечения безопасности эксплуатации климатической камеры позволит обеспечить отсутствие угрозы для здоровья и жизни персоналу, обслуживающему климатическую камеру, сохранность составных частей оборудования на всех этапах эксплуатации и отсутствие ущерба для окружающей среды при штатной эксплуатации и минимальный ущерб при авариях и нештатных ситуациях.

#### **Библиографические ссылки**

1. Федеральный закон от 27.12.2002 №184 О техническом регулировании – Москва, 2002.
2. Федеральный закон от 21.07.1997 №116 О промышленной безопасности опасных производственных объектов – Москва, 1997.
3. Технический регламент таможенного союза 010/2011 от 18.10.2011 О безопасности машин и оборудования – Москва, 2011.

#### **References**

1. Federal Law №184 of 27.12.2002 On Technical Regulation – Moscow, 2002.
2. Federal Law №116 of 21.07.1997 On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities – Moscow, 1997.
3. Customs Union Regulation 010/2011 of 18.10.2011 On the safety of machinery and equipment – Moscow, 2011.

© Нестерова М. Г., Жирнова Е. А., 2023

УДК 614

## СПЕЦИФИКА ВНЕДРЕНИЯ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Э. И. Панина, А. В. Хилюк

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: emifa98@mail.ru

*Ракетно-космическая отрасль, является одной из высокотехнологичных и сложных отраслей в мире. В связи с чем, требует повышенного внимания к вопросам безопасности на предприятии. В статье рассмотрены практические инструменты развития культуры безопасности, в том числе на примере нефтегазовой отрасли.*

*Ключевые слова: безопасность, культура безопасности, производство, нулевой травматизм, рискориентированный подход, отчетность, отчет о выявлении риска, отчет о наблюдении/вмешательстве.*

## SPECIFICS OF THE IMPLEMENTATION OF THE COMPANY'S SAFETY CULTURE

E. I. Panina, A. V. Khilyuk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: emifa98@mail.ru

*The rocket and space industry is one of the most high-tech and complex industries in the world. In this connection, it requires increased attention to security issues at the enterprise. The article discusses practical tools for developing a safety culture, including the example of the oil and gas industry.*

*Keywords: safety, safety culture, production, zero injury, risk-based approach, reporting, Risk Identification Report, Observation/Intervention Report.*

**Введение.** В истории человечества и промышленности существовали этапы, когда жизнь и здоровье работников стояли не на первом месте. Высшими приоритетами на предприятиях являлись высокая производительность труда и извлечение максимальной прибыли.

Такой подход нередко приводил к несчастным случаям, серьезным авариям и потерям жизней. Однако со временем, подход к безопасности работников изменился. После серьезных инцидентов работодатели задумались о последствиях халатного отношения к жизни и здоровью работников, в том числе, благодаря государственному регулированию. На сегодняшний день развитие современной ракетно-космической отрасли невозможно без рискориентированных подходов и взаимосвязи между здоровьем работников, стабильностью команды и стабильным результатом [1,2].

**Результаты исследований.** После Чернобыльской трагедии в 1986 году эксперты Международной консультативной группы по ядерной безопасности (МАГАТЭ) изучающие ее причины и последствия впервые объединили понятия «культура» и «безопасность» и признали, что отсутствие культуры безопасности явилось одной из основных причин этой аварии [3].

Согласно принятому МАГАТЭ определению: «культура безопасности (КБ) – это такой набор характеристик и особенностей деятельности организаций и отдельных лиц, который устанавливает, что проблемам безопасности, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, определяемое их значимостью» [4].

Главной целью внедрения и развития культуры безопасности является формирование среды ответственного отношения компании и каждого ее работника к вопросам безопасности, а как следствие – снижение количества происшествий, аварий и травматизма до нулевого значения.

В виду того, что ракетно-космическая промышленность характеризуется повышенной сложностью технологического процесса и множеством опасных факторов, внедрение и развитие культуры безопасности в данной отрасли является приоритетным вопросом.

В данной статье на примере нефтесервисной компании приведен один из инструментов культуры безопасности, который на практике позволил существенно снизить количество травматизма на предприятии. Этот положительный опыт возможно рассмотреть и в рамках ракетно-космической промышленности.

Таким инструментом является внесение отчетов о выявлении риска (Risk Identification Report) и отчеты о наблюдении/вмешательстве (Observation/Intervention Report). Внесением отчетов такого характера занимаются не только специалисты по охране труда и промышленной безопасности, этот инструмент доступен абсолютно каждому сотруднику.

Суть отчетов заключается в том, чтобы развить в сотрудниках наблюдательность и рискориентированный подход. Привить понимание, что в ситуации, в которых появляется несоответствие, нарушение установленных норм и правил, не только можно, но и нужно вмешаться и остановить работы.

Статистика Компании показала прямую зависимость количества травматизма от количества отчетов о выявлении риска и отчетов о наблюдении/вмешательстве.

За 10 лет применения этого инструмента количество отчетов возросло в 6 раз, а уровень травматизма снизился в 4 раза и приблизился к показателю нулевого травматизма.

**Заключение.** Таким образом, инструмент внесения отчетов хорошо зарекомендовал себя многолетним опытом и стабильным положительным результатом. Этот положительный опыт возможно рассмотреть и в рамках ракетно-космической отрасли. Работа с мышлением сотрудников, настрой их на рискориентированный подход, развитие культуры безопасности предприятия – важнейший шаг на пути к нулевому травматизму.

### Библиографические ссылки

1. Беленький А. Н., Карасев Д. В., Тихонова Н. А. Развитие современной ракетно-космической отрасли: роль научно-технических инноваций // Молодой ученый. – 2016. – № 20. URL: <https://moluch.ru/archive/124/34155/> (дата обращения: 07.09.2023).

2. Перминов А., Давыдов В. Состояние и перспективы космической деятельности Российской Федерации // Промышленная политика в Российской Федерации. – 2006. – №10. URL: [https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/zemlya\\_i\\_vselennaya/2005/perminov.html](https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/zemlya_i_vselennaya/2005/perminov.html) (дата обращения: 07.09.2023).

3. Головин Н.Л. Понятие «культура безопасности», его развитие и анализ // Педагогический журнал. 2021. Т.11. № 4А.С. 32-47. DOI:10.34670/AR.2021.14.17.004. URL: <http://publishing-vak.ru/file/archive-pedagogy-2021-4/a4-golovin.pdf> (дата обращения: 03.09.2023).

4. «Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности», № 75-INSAG-4, КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ, МАГАТЭ, ВЕНА, 1991 г. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub882r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub882r_web.pdf) (дата обращения: 03.09.2023).

5. Прыгунов, П. В. Культура безопасности – приоритет производственной деятельности / П. В. Прыгунов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2019. – № 26 (264). URL: <https://moluch.ru/archive/264/61284/> (дата обращения: 07.09.2023).

### References

1. Belenky A. N., Karasev D. V., Tikhonova N. A. The development of the modern rocket and space industry: the role of scientific and technical innovations // Young Scientist. – 2016. – No. 20. Available at: <https://moluch.ru/archive/124/34155/> (accessed: 07.09.2023).

2. Perminov A., Davydov V. The state and prospects of space activity of the Russian Federation // Industrial policy in the Russian Federation. – 2006. – No.10. Available at: [https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/zemlya\\_i\\_vselennaya/2005/perminov.html](https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/zemlya_i_vselennaya/2005/perminov.html) (accessed: 07.09.2023).

3. Golovin N.L. The concept of "safety culture", its development and analysis // Pedagogical Journal. 2021. VOL.11. No. 4A.PP. 32-47. DOI:10.34670 / AR.2021.14.17.004. Available at: <http://publishing-vak.ru/file/archive-pedagogy-2021-4/a4-golovin.pdf> (accessed: 03.09.2023).

4. "Report of the International Advisory Group on Nuclear Safety", No. 75-INSAG-4, SAFETY CULTURE, IAEA, VIENNA, 1991. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub882r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub882r_web.pdf) (accessed: 03.09.2023).

5. Prygunov, P. V. Safety culture is the priority of production activity / P. V. Prygunov. – Text : direct // Young scientist. – 2019. – № 26 (264). Available at: <https://moluch.ru/archive/264/61284/> (accessed: 07.09.2023).

УДК 66: 543: 615.322

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРОХОВОЙ МУКИ ДЛЯ ОСНОВЫ КОСМОПИТА НА ТРИПСИНИН-ГИБРИРУЮЩЮЮ АКТИВНОСТЬ

Е. Е. Пронин<sup>1</sup>, Д. А. Стопа<sup>1</sup>, Т. А. Лунева<sup>1</sup>, Д. Г. Слещинин<sup>1</sup>, Е. Ю. Семенюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Красноярский техникум сварочных технологий и энергетики  
Российская Федерация, 660122, г. Красноярск, ул. 60 лет Октября, 155, Корпус №1  
E-mail: Luneva@sibsau.ru

*Приведены результаты исследования трипсинингибирующей активности в гороховой муке при термической обработке и длительном хранении. Определены перспективы использования кондитерских изделий из гороховой муки при производстве космопита.*

*Ключевые слова: трипсин, ингибиторы, гороховая мука, активность, космопит.*

## THE STUDY OF PEA FLOUR FOR THE BASIS OF COSMOPOLITAN ON TRIPISNINGIBIRUYUSHCHY ACTIVITY

E. E. Pronin<sup>1</sup>, D. A. Stopa<sup>1</sup>, T. A. Luneva<sup>1</sup>, D. G. Slashchinin<sup>1</sup>, E. Y. Semenyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Krasnoyarsk Technical School of Welding Technologies and Energy  
Russian Federation, 660122, Krasnoyarsk, ul. 60 let Oktyabrya 155, Building No. 1  
E-mail: Luneva@sibsau.ru

*The results of the study of trypsin-inhibiting activity in pea flour during heat treatment and long-term storage are presented. The prospects for the use of confectionery products from pea flour in the production of cosmopolitan are determined.*

*Keywords: trypsin, inhibitors, pea flour, activity, cosmopit.*

В последние десятилетия развитие космических исследований и полетов открыло перед человечеством новые перспективы в освоении космоса. Однако, совместно с этим возникают и необходимости в решении ряда сложных проблем, таких как удовлетворение биологических потребностей и сохранение здоровья астронавтов в непригодной для жизни среде. Один из ключевых факторов здесь – это питание в космосе. В настоящее время ведется активная разработка космопита с повышенной биологической ценностью с применением нетрадиционного растительного сырья, позволяющего восполнить недостающие нутриенты. Особенно актуальна проблема обогащения продуктов питания белком и незаменимыми аминокислотами. Перспективной основой для космопита являются белки гороха, т.к. они обладают хорошей растворимостью, усвояемостью и высокой биологической ценностью. Более того, в них содержатся в достаточном количестве все незаменимые аминокислоты, необходимые для нормальной жизнедеятельности человеческого организма [1].

Однако, помимо полезных компонентов, в горохе содержится ряд веществ, определяющих его антипитательные свойства, основным из которых являются ингибиторы трипсина и химотрипсина, которые могут составлять от 5 до 10 % от общего количества белка [2]. Ингибиторы связываются выше указанными ферментами в комплексы, инактивируя их, что, в свою очередь, приводит к повышенной выработке ферментов и, как следствие, к гипертрофии поджелудочной железы [3-5]. Установлено также, что ингибиторы также усиливают в организме дефицит серосодержащих аминокислот [3].

Таким образом, проблема снижения активности ингибиторов протеиназ растений семейства бобовых и гороха, в частности, требует дополнительного изучения с тем, чтобы использовать продукты переработки гороха в космической гастрономии как ценный источник белка и незаменимых аминокислот.

Целью нашей работы явилось изучение уровня активности ингибиторов трипсина в гороховой муке при ее хранении.

Активность трипсина определялась модифицированным методом Ансона в присутствии экстрактов ингибиторов протеиназ, полученных из гороховой муки и функционального кондитерского изделия, основой для изготовления которого явилась рецептура печенья «Шаганак», и без них [6].

Средняя активность трипсина в исследуемых пробах приставлена в табл. 1.

Таблица 1

**Активность трипсина в исследуемых пробах гороховой муки в зависимости от сроков ее хранения**

№ п/п	Срок хранения	Активность трипсина, ед. ПС/г
1	12 месяцев	0,65
2	6 месяцев	0,61
3	3 месяца	0,30
4	1 месяц	0,29

Установлено, что при хранении гороховой муки активность ингибитора снижается. Если в свежей муке активность ингибитора по сравнению с контролем составляет 60,8 %, через 1 месяц – 59,8 % через 3 месяца – 47,4 %, через 6 месяцев – 39,8 %, через 1 год – 30,0 %. Эти данные косвенно подтверждаются результатами Друшляк Н.Г., которая исследовала активность ингибитора в семенах сои [5]. Результаты исследования показали, что активность ингибитора значительно снижается через 6 месяцев хранения муки.

Также исследовалась активность трипсина в 25 пробах печенья с частичной заменой (15 %) пшеничной муки на гороховую.

Сравнительная характеристика активности трипсина в сырье и готовом кондитерском изделии показывает, что активность ингибитора снизилась на 14,3 %, что представлено на рис. 1.

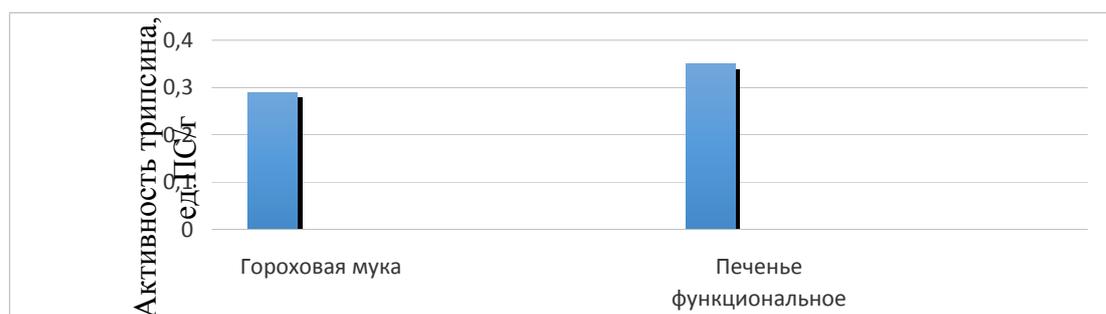


Рис. 1. Активность трипсина в сырье

В результате проведенного исследования были получены данные об изменении динамики активности ингибиторов в процессе хранения гороховой муки, установлено снижение активности ингибиторов в кондитерском изделии, изготовленном по модифицированной рецептуре по сравнению с таковой в сырье, а также при хранении гороховой муки более 6 месяцев. Новизна полученных результатов состоит в том, что предыдущие данные были получены на основе исследований, проведенных на других бобовых культурах. Разработана, технологически обоснована и апробирована рецептура функционального кондитерского изделия, обогащённого белком, которую можно внедрить в производство космопита.

### Библиографические ссылки

1. Пищевая химия / А.П. Нечаев, С.Е. Траубенберг, А.А. Кочеткова и др. Под ред. А.П. Нечаева. Издание 4-е, испр. и доп. СПб.: ГИОРД, 2007. – 640 с.
2. Киреева Т.В., Бронникова В.В., Использование гороховой муки в производстве хлебобулочных изделий // Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. Мытищи: изд-во Российской университет кооперации. – № 6, 2013, С. 124-127.
3. Павловская Н.Е. Биохимия фасоли: монография / Н.Е. Павловская, И.Н. Гагина, М.П. Мирошникова. – Орел: изд-во ОрелГАУ, 2008. – 128 с.
4. Петибская В.С. Пути снижения трипсинингибирующей активности сои. «Известия вузов. Пищевая технология» №1, 2000.- С. 6-8.
5. Друшляк Н.Г. Изменение физиолого-биохимических характеристик семян гороха в процессе хранения // Ученые записки Орловского государственного университета. – Научный журнал. Орел: изд-во Орел ГАУ – № 6 (50), 2012, С. 378-380.
6. Практикум по биохимии: Учебное пособие / Под ред. С.Е. Северина, Г.А. Соловьевой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. МГУ, 1989. – 509 с.

### References

1. Pishchevaya khimiya / A.P. Nechaev, S.E. Traubenberg, A.A. Kochetkova i dr. Pod red. A.P. Nechaeva. Izdanie 4-e, ispr. i dop. SPb.: GIORД, 2007. – 640 p.
2. Kireeva T.V., Bronnikova V.V., Ispol'zovanie gorokhovoі muki v proizvodstve khlebobulochnykh izdelii // Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya kooperativnogo sektora ekonomiki. Mytishchi: izd-vo Rossiiskii universitet kooperatsii. – № 6, 2013, P. 124-127.
3. Pavlovskaya N.E. Biokhimiya fasoli: monografiya / N.E. Pavlovskaya, I.N. Gagrina, M.P. Miroshnikova. – Orel: izd-vo OrelGAU, 2008. – 128 p.
4. Petibskaya V.S. Puti snizheniya tripsiningibiruyushchei aktivnosti soi. «Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya» №1, 2000.- P. 6-8.
5. Drushlyak N.G. Izmenenie fiziologo-biokhimicheskikh kharakteristik semyan gorokha v protsesse khraneniya // Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. – Nauchnyi zhurnal. Orel: izd-vo Orel GAU – № 6 (50), 2012, P. 378-380.
6. Praktikum po biokhimii: Uchebnoe posobie / Pod red. S.E. Severina, G.A. Solov'evoi. – 2-e izd., pere-rab. i dop. – M.: Izd. MGU, 1989. – 509 p.

© Пронин Е. Е., Стопа Д. А., Лунева Т. А., Слащинин Д. Г., Семенюк Е. Ю., 2023

УДК 624.144.53

## ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СНЕГООЧИСТКИ КРОВЕЛЬ ЗДАНИЙ – ЭЛЕМЕНТ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА\*

Т. А. Саулова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: totalsay@yandex.ru

*Раскрыты основные преимущества разработанной технологии снегоочистки кровель зданий, обозначена универсальность её использования, в том числе компанией, управляемой Росавиацией.*

*Ключевые слова: объекты авиационной инфраструктуры, кровля, накопление снега, пневматическая очистка, безопасность.*

## INNOVATIVE TECHNOLOGY OF SNOW CLEARING OF BUILDING ROOFS – AN ELEMENT OF AIR TRANSPORT INFRASTRUCTURE SAFETY

T. A. Saulova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: totalsay@yandex.ru

*The main advantages of the developed technology of snow clearing of building roofs are disclosed, the versatility of its use, including by the company managed by Rosaviatsia, is outlined.*

*Keywords: aviation infrastructure facilities, roof, snow accumulation, pneumatic cleaning, safety.*

**Введение.** К объектам инфраструктуры воздушного транспорта относятся, в том числе, сооружения, здания, расположенные на территориях аэропортов, предназначенные для обеспечения авиационной безопасности, оказания услуг. Все они нуждаются в своевременной очистке кровель от снега. Зная, что 1 м<sup>3</sup> слежавшегося снега на кровле весит более 250-300 кг, не сложно представить значимость угроз [1]. Статистика чрезвычайных происшествий подтверждает это. Только в период с 2006 г по 2022 г из-за обрушений кровель от накопившегося снега произошло 15 катастроф, погибли более 120 человек, ранены более 60 человек [2]. Чрезвычайные ситуации такого рода, к сожалению, продолжают происходить во всех городах России, каждую зиму фиксируют ущербы зданиям, автомобилям и здоровью людей от непредвиденного схода снега и падения сосулек с крыш. Анализ рисков влияния «снежной» стихии на техносферные объекты позволил выявить основную причину трагедий – несвоевременная очистка кровель от снега и наледи. Ежегодная статистика происшествий указывает на то, что эта проблема до сих пор не решена и вопрос своевременной очистки кровель от снега и наледи стоит очень остро.

**Результаты.** В качестве альтернативы механическим способам очистки кровель коллективом учёных кафедры безопасности жизнедеятельности Сибирского государственного университета имени академика М.Ф. Решетнёва под руководством Т. А. Сауловой разработана технология автоматического пневматического предупреждения осадения осадков в виде снега на кровле зданий и разработан опытный образец устройства. Проект «Проектирование и разработка технологии дистанционного управления очисткой кровель зданий от снега» реализован в рамках конкурса грантов, инициатором

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» и Открытого акционерного общества «Российские железные дороги» в рамках реализации научного проекта № 2022101608895 «Разработка и проектирование технологии дистанционного управления очисткой кровель зданий от снега».

которого выступил Красноярский краевой фонд науки, функциональным заказчиком – Красноярский филиал ОАО «РЖД». По размерам реальной кровли здания, эксплуатируемой заказчиком в п. Кача Красноярского края, изготовлена экспериментальная модель, включающая опытный образец. Экспериментальная модель – макет кровли, полученный и изготовленный путём усечения  $\frac{1}{2}$  части реальной кровли, и аэродинамическая система. Опытный образец включает аэродинамическую систему и систему управления процессом снегоочистки. Аэродинамическая система показана на рис. 1 и представляет собой систему воздухопроводов: отводящие воздухопроводы; трасса, укрепленная вдоль коньковой части кровли; выходные патрубки из трассы; сопловые воздухораспределители (сопла), направленные на кровлю – (а) и воздуходувное оборудование, располагаемое под кровлей, в чердачном пространстве – (б). Система управления процессом работы оборудования предусматривает три режима работы: автоматический, дистанционный и ручной (контроль), представлена датчиком осадков и щитом с электрической, автоматической оснасткой и преобразователем частот двигателя.



а



б

Рис. 1. Принципиальное устройство аэродинамической системы:  
а – трасса с сопловыми воздухораспределителями и датчиком осадков;  
б – воздуходувное оборудование и система управления

Суть идеи предупреждения снегонакопления заключается в следующем: включение устройства обеспечивает один из режимов системы управления. Оборудование начинает работу в оптимальном режиме таймирования, установленном опытным путём: импульс 30 мин – пауза 10 мин. В процессе работы воздух, поступающий в трассу, выходит через щелевидные сопла с усилием, оптимальным давлением, которое обеспечивает дальнобойность и максимальную зону обслуживания (сдува) кровли, практически без «слепых» зон [3]. Предупреждающий эффект осаждения снежинок на поверхность кровли зданий обеспечивается отладкой сопел относительно наклона и поверхности ската кровли – направления луча осевой скорости воздушного потока. Опытным путём установлено, что направление скоростной оси чуть выше края кровли (в параллель кровле) создаёт зону турбулентного воздушного потока над поверхностью кровли 0,3-0,7 м, «сметая» снежинки ещё на подлёте к поверхности кровли. Такой эффект можно получить только при слабом и среднем снегопаде, в связи с тем, что свободная (или частично настилаящаяся) струя быстро теряет необходимую скорость потока, требуя увеличения мощности оборудования.

Если снегопад «густой», а снежинки влажные и крупные, целесообразно применить настройку сопел, при которой луч осевой скорости потока направлен в точку на кровле, расположенной от края на 1,5-2,0 м. В этом случае возникает эффект Коанда – настилаящиеся на поверхность струи воздуха вызывают усиление скорости потока в 1,4-1,5 раза и дают большую ширину зоны обслуживания в сравнении со свободными струями (не ограниченными поверхностями) [4, 5].

**Выводы.** Таким образом, выводы об эффективности разработанной технологии обусловлены полученными результатами теоретических исследований, расчётов, экспериментов и аналитической работы, доказывающими возможность применения технологии с использованием сжатого воздуха для предупреждения осаждения снега на кровле с соблюдением требований пожаровзрывобезопасности устройства оборудования в чердачном пространстве, требований к износостойкости и морозоустойчивости материалов, надёжности защиты от обледенения. Итоги апробации технологии позво-

ляют утверждать о целесообразности дальнейшей работы по оптимизации её технологических и конструкционных параметров.

### Библиографические ссылки

1. Сайт Метеоцентра России [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoclub.ru/index.php?action=vthread&topic=1005&page=8> (дата обращения 06.09.2023).
2. МЧС РФ: Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения 06.09.2023).
3. Сопловые воздухораспределители [Электронный ресурс]. URL: <http://catalog.vseventilatory.ru/catalogue/hidria-rotomatika/23-catalogue-hidria-rotomatika-nozzle-diffusers.pdf> (дата обращения 06.09.2023).
4. Теория турбулентных струй/ Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников и др. М.: Наука 1984. 716 с.
5. Илюшин Б. Б., Красинский Д. В. Моделирование динамики турбулентной круглой струи методом крупных вихрей//Теплофизика и аэромеханика. 2006. № 1 (13). С. 47-61.

### References

1. *Sayt Meteotsentra Rossii* [Website of the Meteocenter of Russia]. Available at: <https://nia.eco/2022/04/11/34275> (accessed 06.09.2023).
2. *MChS RF: Ofitsial'nyy sayt* [Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation: Official Website]. Available at: URL: <https://mchs.gov.ru/> (accessed 06.09.2023).
3. *Soplovye vozdukhoraspredeleteli* [Nozzle air diffusers]. Available at: <http://catalog.vseventilatory.ru/catalogue/hidria-rotomatika/23-catalogue-hidria-rotomatika-nozzle-diffusers.pdf> (accessed 06.09.2023).
4. Abramovich G. N., Girshovich T. A., Krasheninnikov S. Yu. [Theory of Turbulent Jets] M.: Nauka Publ., 1984, 716 p.
5. Ilyushin B. B., Krasinsky D. V. [Large eddy simulation of the turbulent round jet dynamics]. *Теплофизика и аэромеханика*. 2006, vol. 13. no. 1. p. 43-54 (In Russ.).

© Саулова Т. А., 2023

УДК 624.144.53

## ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕХНОЛОГИИ ПНЕВМООЧИСТКИ КРОВЕЛЬ ОТ СНЕГА\*

Т. А. Саулова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: totalsay@yandex.ru

*Раскрыты факторы инвестиционной привлекательности применения разработанной технологии снегоочистки кровель зданий для широкого применения.*

*Ключевые слова: экономическая целесообразность, кровля, накопление снега, пневматическая очистка, безопасность.*

## INVESTMENT ADVANTAGES PNEUMATIC SNOW REMOVAL TECHNOLOGIES FOR ROOFS

T. A. Saulova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: totalsay@yandex.ru

*The factors of investment attractiveness of application of the developed technology of snow clearing of roofs of buildings for wide application are disclosed.*

*Keywords: economic feasibility, roofing, snow accumulation, pneumatic cleaning, safety.*

**Введение.** Особенностью климатических условий территории Красноярского края является выпадение большого количества снега в холодный период года. В течение всего холодного периода, начиная с ноября по май могут выпадать осадки в виде снега с разной интенсивностью и продолжительностью снегопада. По данным метеосводок за 2022 год зафиксировано 84 дня, когда наблюдалось выпадение снега [1]. Самые снежные, особенно в пригородных зонах, месяцы: февраль, март, апрель. Чтобы избежать трагедий и ущербов, связанных с обрушением стропильных конструкций под тяжестью накопленного снега, с внезапным его «сходом» и падением сосулек, необходима систематическая очистка кровель. Из всех известных способов очистки – механических, химических, термических – отдаётся предпочтение механической очистке с использованием ручного труда. Используют не сложные в обслуживании приспособления и инструмент: лопаты, скребки, петли и специальные механизмы, в том числе с использованием сжатого воздуха. Все эти способы предусматривают выполнение работ на высоте, связанных с риском падения, что может повлечь за собой тяжёлые и экономически затратные последствия.

**Результаты.** В отличие от рискованных способов ручной механической очистки кровель разработанная научным коллективом кафедры безопасности жизнедеятельности СибГУ им. М. Ф. Решетнёва технология исключает работу на высоте за счёт использования автоматического и дистанционно управляемого пневматического аэродинамического устройства, работа которого не допускает накопления снега на скатных кровлях зданий. Разработанная технология предназначена для преду-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» и Открытого акционерного общества «Российские железные дороги» в рамках реализации научного проекта № 2022101608895 «Разработка и проектирование технологии дистанционного управления очисткой кровель зданий от снега».

преждения снегонакопления на скатных кровлях всех типов: односкатных, двускатных, шатровых, вальмовых.

Аэродинамическая система устройства включает систему воздухопроводов: от воздуходувки вихревой, которая расположена в чердачном пространстве – далее через кровлю вдоль конька кровли до щелевых выходных отверстий сопловых распределителей, расположенных равномерно по трассе через 0,64 м, направленных вдоль поверхности скатов кровли. Управление работой оборудования возможно в автоматическом, дистанционном и ручном режимах.

Автоматическая система включает датчик осадков, осуществляющий мониторинг наличия снега и автоматическую оснастку, обеспечивает автоматическое срабатывание, отключение на сигнал датчика, систему SMS-оповещения оператора о корректной работе оборудования и об аварии. Система может обслуживаться тремя операторами дистанционно. С целью экономии электроэнергии имеется возможность установления таймера на случай продолжительного слабого снегопада (менее 10 хлопьев/м<sup>3</sup>).

Комплект документов, сформированных по результатам реализации проекта, включает технологическую, конструкторскую и эксплуатационную документацию.

В рамках технико-экономического обоснования технологии сделан расчёт затрат на внедрение устройства на одну наиболее «заносимую» двускатную кровлю заказчика на ст. Балыксу в Хакасии, размером по коньковой части 25,5 м и 10 м – по скатам по методике ОАО «РЖД» [2].

Среднегодовой объём снега, счищаемого «своими силами» с наиболее заносимой кровли на ст. Балыксу, составляет по данным заказчика 1271,3 м<sup>3</sup>. Оценивая затраты на очистку кровель, в итоговую сумму включили покупку и замену инвентаря, страховочных средств, затраты на внеплановый ремонт кровли из-за механического воздействия на неё лопат при очистке, стоимость вывоза и утилизации очищенного снега, затраты на обучение работников. Приняли условно, что объём накопленного на кровле и счищаемого с кровли снега одинаковы.

В результате расчётов выяснили, что с учётом выполнения всех требований трудового законодательства ежегодная сумма затрат на снегоочистку одной особозаносимой кровли (из трёх, по которым заказчик предоставил данные) на ст. Балыксу составляет в среднем 1 443 054,98 руб. [3].

Если привлекать к работе лицензированные на этот вид деятельности компании, обладающие специализированной техникой и квалифицированными рабочими – это более затратное мероприятие, чем очистка с помощью временных работников более чем в четыре раза и составит 4 325 814,00 руб./год.

Такая работа проводится только опытными специалистами, имеющими допуск к высотным работам, прошедшим обучение и проверку знаний [3]. Нарушение трудового законодательства влечёт за собой ответственность [4, 5].

Затраты на применение разработанной технологии автоматической снегоочистки на одну кровлю на ст. Балыксу (на приобретение оборудования, изделий, монтаж, ремонт и содержание оборудования, электроэнергию и другие статьи) составили 1 251 569,00 руб.

Прибыль от внедрения технологии, заключающаяся в экономии средств за счёт исключения производственного травматизма и страховых выплат, связанных с гибелью или травмами людей при падении с высоты, штрафов и уголовного наказания руководителей, составит 12 200 000 руб./год. Срок окупаемости затрат на внедрение технологии 1,14 лет.

**Выводы.** Оценивая экономическую целесообразность и инвестиционную привлекательность применения технологии, можно констатировать: широкое применение устройств в коммунальном хозяйстве инфраструктуры объектов экономики, под управлением единого диспетчерского пункта, автоматическая работа которых полностью заменит ручной труд, исключит риски внезапного схода снега и травмирования людей, позволит существенно снизить страховые выплаты, обеспечит безопасность и комфорт человека в современной техносфере.

#### Библиографические ссылки

1. Погода России от Метеоцентра [Электронный ресурс]. URL: <https://meteocenter.net/weather> (дата обращения 08.09.2023).
2. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности новой техники и технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений (в ред. распоряжения ОАО "РЖД" от 10.11.2009 N 2288р) Утв. распоряжением ОАО "РЖД" от 28.11.2008 г. N 2538р.
3. Приказ Минтруда от 16.11.2020 N 782н. Об утверждении правил по охране труда при работе на

высоте (зарегистрировано в Минюсте России 15.12.2020 N 61477).

4. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 N 195-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2023).

5. Уголовный кодекс Российской Федерации" от 13.06.1996 N 63-ФЗ (ред. от 04.08.2023).

### References

1. *Pogoda Rossii ot Meteotsentra* [Russian weather from the Meteocenter]. Available at: <https://meteocenter.net/weather> (accessed 8.09.2023).

2. *Metodicheskie rekomendatsii po raschetu ekonomicheskoy effektivnosti novoy tekhniki i tekhnologii, ob"ektov intellektual'noy sobstvennosti i ratsionalizatorskikh predlozheniy* [Methodological recommendations for calculating the economic efficiency of new equipment and technology, intellectual property and rationalization proposals] (as amended by the order of JSCo "Russian Railways" dated 10.11.2009 N 2288r) (In Russ.).

3. *Prikaz Mintruda ot 16.11.2020 N 782n Ob utverzhdenii pravil po okhrane truda pri rabote na vysote* [Order of the Ministry of Labor of 16.11.2020 N 782n On Approval of Labor Protection Rules for Work at Height] (In Russ.).

4. *Kodeks Rossiyskoy Federatsii ob administrativnykh pravonarusheniyakh* [Code of the Russian Federation on Administrative Offenses. of 30.12.2001 N 195-FZ ed. of 04.08.2023 (with amendments and additions, in force since 01.09.2023)] (In Russ.).

5. *Ugolovnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Criminal Code of the Russian Federation" of 13.06.1996 N 63-FZ (ed. of 04.08.2023)] (In Russ.).

© Саулова Т. А., 2023

**ПАДЕНИЕ С ВЫСОТЫ:  
ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТРАВМАТИЗМА В КОММУНАЛЬНОЙ СФЕРЕ**

Т. А. Саулова, И. С. Маховская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: totalsay@yandex.ru

*Обозначены направления обеспечения безопасности горожан и снижения уровня травматизма при очистке кровель от снега.*

*Ключевые слова: травматизм, падение с высоты, кровля, накопление снега, пневматическая очистка, безопасность.*

**FALLS FROM HEIGHTS:  
WAYS TO REDUCE INJURIES IN THE UTILITIES SECTOR**

T. A. Saulova, I. S. Makhovskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: totalsay@yandex.ru

*The directions of ensuring the safety of citizens and reducing the level of injuries when clearing snow from roofs were outlined.*

*Keywords: injuries, falls from height, roofing, snow accumulation, pneumatic cleaning, safety.*

**Введение.** По данным Минтруда России в 2022 году зарегистрировано 37 млн. случаев обращений россиян к медицинским службам из-за падений с высоты, при этом 646 тыс. человек погибли. Падение – это причина более 33% несчастных случаев на производстве и потерь 600 тыс. человеко-дней в российской экономике [1]. Официальные данные, представленные в Госдокладе «О деятельности Государственной инспекции труда по Красноярскому краю в 2022 году» (26,8 % всех случаев – это падение с высоты), коррелируют с цифрами мировой и отечественной статистики и свидетельствуют об актуальности этих проблем [2]. Анализ случаев показал, что на каждые 690 случаев падений приходится 1 – со смертельным исходом, 4 – влекут стойкую потерю трудоспособности, 13 – требуют госпитализации на 10 дней, 24 случая сопряжены с госпитализацией на срок 1-9 дней [2]. В этой статистике немалую долю случаев занимает падение работников с кровли при её очистке от снега. Визуальная оценка состояния накопления снега субъективна и не всегда своевременна, момент принятия решения на очистку характеризуются большой долей неопределённости (слой снежного покрова 30 см). Иногда к работам привлекают неквалифицированную рабочую силу (из-за дешевизны труда) или справляются «своими силами». К сожалению, сложившаяся практика экономии часто приводит к трагедиям. Наиболее распространённый способ очистки кровель – механический с использованием простых приспособлений и инструмента и специальных механизмов, управляемых рабочими – связан с рисками падения и социально-экономического ущерба (рис. 1).

Приказ Минтруда от 16.11.2020 №782н «Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте» устанавливает обязательные требования, предъявляемые к руководителям, организаторам и исполнителям работ на высоте, указывает на их признаки (рис. 2) [3].

**Результаты.** Научный коллектив кафедры безопасности жизнедеятельности СибГУ им. М. Ф. Решетнёва разработал и реализовал технологию автоматического предупреждения снегонакопления на скатных кровлях зданий. В отличие от рискованных способов устройство исключает работу на высоте, имеет систему дистанционного и ручного управления. Основная идея технологии – автоматиче-

ское предотвращение накопления снега за счёт режимной работы пневматического аэродинамического устройства.

С целью социально-экономического обоснования затрат на внедрение технологии рассчитали показательные значения рисков падений с высоты по данным 2022 года (табл. 1).



Рис. 1. Красноярск, март 2023 г.

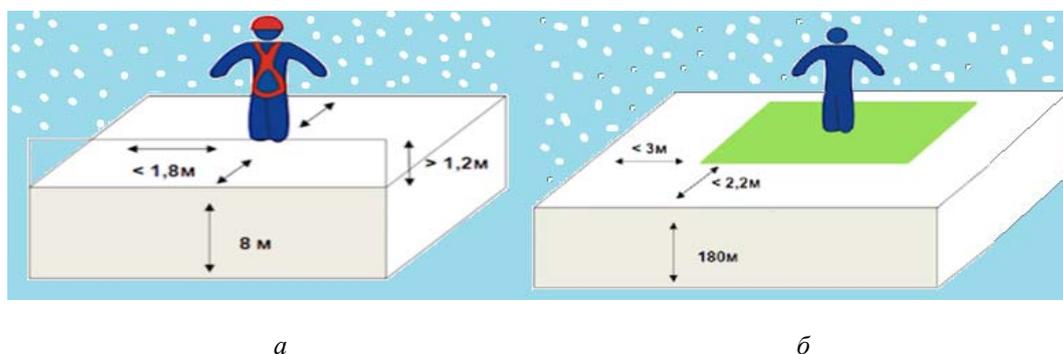


Рис. 2. Признаки работ, проводимых на высоте:

а – условия, относящиеся к работе на высоте; б – условия, не относящиеся к работе на высоте

Таблица 1

Расчётные значения рисков  $R$ , чел/год<sup>-1</sup>, количества случаев падения с высоты,  $K$ , чел/год

$R_{см\ общ}$	$R_{пад}$	$R_{пад\ зан}$	$R_{см\ зан}$	$R_{пад\ см\ зан}$	$K_{зан}$	$K_{см\ зан}$
$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$2,68 \cdot 10^{-1}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	17 938 848	358 777

\*Риски падения:  $R_{см\ общ}$  – со смертельным исходом занятых и незанятых;  $R_{пад}$  – занятых и незанятых;  $R_{пад\ зан}$  – падения занятых;  $R_{пад\ см\ зан}$  – со смертельным исходом занятых.

\*\*Количество случаев падения:  $K_{зан}$  – с травмами занятых;  $K_{см\ зан}$  – со смертельным исходом занятых.

**Выводы.** Все рассчитанные значения рисков по общепринятым критериям относятся к области чрезмерного риска и требуют срочной минимизации или запрета деятельности, связанной с ними. Любые работы на высоте всегда сопряжены с риском получения производственной травмы вплоть до смертельных случаев. Некомпетентность персонала значительно увеличивает риск травм во время выполнения работ по очистке кровель. Нарушение требований охраны труда и халатное отношение к ним наказываются Кодексом РФ об административных нарушениях и Уголовным кодексом РФ [4, 5]. Нормативные документы рекомендуют отказаться от работ на высоте, использовать альтернативные способы их выполнения, если это возможно. Как раз такой альтернативой является применение разработанной технологии дистанционного управления снегоочисткой и предупреждения накопления снега на кровле, полностью исключая работу на высоте, и, соответственно, риск падений, риск механических повреждений, обрушений кровель от повышения давления накопленной массы снега.

### Библиографические ссылки

1. Минтруда: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: [mintrud.gov.ru](http://mintrud.gov.ru) (дата обращения 09.09.2023).
2. Государственный доклад «О деятельности Государственной инспекции труда по Красноярскому краю в 2022 году» [Электронный ресурс]. URL: [git24.rostrud.gov.ru](http://git24.rostrud.gov.ru) (дата обращения 09.09.2023).
3. Приказ Минтруда от 16.11.2020 N 782н. Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте (зарегистрировано в Минюсте России 15.12.2020 N 61477).
4. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 N 195-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2023).
5. Уголовный кодекс Российской Федерации" от 13.06.1996 N 63-ФЗ (ред. от 04.08.2023).

### References

1. *Mintruda: Ofitsial'nyy sayt* [Ministry of Labor: official website]. Available at: <https://meteocenter.net/weather> (accessed 09.09.2023).
2. *Gosudarstvennii doklad «O deyatelnosti gosudarstvennoi inspeksii truda po Krasnoyarskomu krayu v 2022 godu»* [State report "On the activities of the State Labor Inspectorate for Krasnoyarsk Krai in 2022"]. Available at: [git24.rostrud.gov.ru](http://git24.rostrud.gov.ru) (accessed 09.09.2023).
3. *Prikaz Mintruda ot 16.11.2020 N 782n Ob utverzhdenii pravil po okhrane truda pri rabote na vysote* [Order of the Ministry of Labor of 16.11.2020 N 782n On Approval of Labor Protection Rules for Work at Height] (In Russ.).
4. *Kodeks Rossiyskoy Federatsii ob administrativnykh pravonarusheniyyakh* [Code of the Russian Federation on Administrative Offenses. of 30.12.2001 N 195-FZ ed. of 04.08.2023 (with amendments and additions, in force since 01.09.2023)] (In Russ.).
5. *Ugolovnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Criminal Code of the Russian Federation" of 13.06.1996 N 63-FZ (ed. of 04.08.2023)] (In Russ.).

© Саулова Т. А., Маховская И. С., 2023

УДК 330.322

## **ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РИСКОВ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ**

Р. Т. Сиротенко, О. В. Тасейко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: epepsi2020@gmail.com

*В работе рассматриваются потенциальные риски техносферы для муниципальных образований СФО, анализируются основные факторы формирующие уровни потенциальных территориальных рисков.*

*Ключевые слова: оценка рисков, вероятность возникновения опасных событий в техносфере, потенциально опасные объекты.*

## **ASSESSMENT OF POTENTIAL RISKS OF HAZARDOUS INDUSTRIES IN THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT**

R. T. Sirotenko, O. V. Taseiko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: epepsi2020@gmail.com

*The paper considers the potential technospheric risks for the municipalities of the Siberian Federal District, analyzes the main factors that form the levels of potential territorial risks.*

*Keywords: risk assessment, probability of dangerous events in technosphere, potentially dangerous objects.*

Научно-технологическое развитие Российской Федерации является одним из приоритетов государственной политики и определяется комплексом внешних и внутренних факторов, формирующих систему больших вызовов, которые создают существенные риски для общества, экономики, системы государственного управления [2]. Одним из способов снижения влияния этих факторов является оценка территориальных рисков развития, возникающих на территории отдельных муниципальных образований или субъектов в целом. Существующие системы оценки рисков территорий основываются на анализе статистических данных о произошедших природных или техногенных ЧС и происшествиях. Технологическое развитие страны приводит к накоплению рисков потенциальных, которые в виде ЧС к настоящему моменту не реализовались. Целью работы являлось получение коэффициентов модели оценки техносферных рисков для потенциально опасных промышленных объектов (ПОО) СФО.

Объектом исследования являлись ПОО, располагающиеся на территории муниципальных образований субъектов СФО. Для характеристики муниципальных образований использовалась концепция С-П-Т системы [5]. Задачей исследования являлась разработка модели оценки потенциальных рисков техносферы муниципальных образований. Для решения поставленной задачи разработана база данных, включающая характеристики ПОО, которые могут быть использованы для оценки потенциальных территориальных рисков. В работе использовалась межведомственная модель оценки рисков, разработанная Международным агентством по атомной энергии [1-3]. Некоторые коэффициенты модели были модифицированы авторами [6].

Согласно используемой модели, вероятность возникновения потенциально опасной ситуации на ПОО, расположенных на исследуемых территориях, определяется следующим соотношением:

$$P_{\Pi}^T = \sum_{i=1}^4 N_i^{ОО} \cdot 10^{-(n_i^1 + n_i^2 + n_i^3)}$$

$N_i^{ОО}$  – количество ПОО по группам опасности;  $n_i^1$  – показатель вероятности аварийной ситуации на ПОО по группам опасности;  $n_i^2$  – поправка, учитывающая организационно-управленческие аспекты безопасности ПОО по группам опасности;  $n_i^3$  – поправка, учитывающая степень износа оборудования на ПОО по группам опасности; группы опасности:  $i=1$  – химически опасные объекты;  $i=2$  – пожаровзрывоопасные объекты;  $i=3$  – радиационно-опасные объекты;  $i=4$  – гидротехнические сооружения.

Значения коэффициента  $n^2$  определялись на основе категории риска ПОО с использованием данных Федеральной службы по труду и занятости [4]. Коэффициенты  $n^1, n^3$  определялись с учетом экспертных оценок состояния объектов и видов наиболее опасных аварийных ситуаций по группам опасности [1;3]. Оценка ущерба от возникновения потенциально-аварийных ситуаций является отдельной задачей и будет выполняться в дальнейшем для получения показателей потенциальных рисков техносферы.

Определение частоты возникновения потенциально опасных техногенных событий является одним из важных этапов разработки системы управления рисками С-П-Т систем промышленных регионов [5]. Развитие предлагаемого подхода будет включать оценку потенциальных территориальных рисков техносферы муниципальных образований субъектов СФО с учетом потенциальных ущербов и картографирование полученных результатов.

### Библиографические ссылки

1. IAEA-TECDOC-727. ISSN 1011-4289. Руководство по классификации и приоритизации рисков, связанных с крупными авариями в технологических процессах и смежных отраслях промышленности. – Vienna: IAEA, 1993
2. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642; В редакции Указа Президента Российской Федерации от 15.03.2021 № 143
3. Экспресс-методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах – складах горюче-смазочных материалов / Е.Е. Невская, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, В.С.[и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – №3. – С. 62-68.
4. РОСТРУД: Федеральная служба по труду и занятости; Перечень работодателей, деятельность которых отнесена к определённой группе риска на 30.06.2023/ <https://rostrud.gov.ru/rostrud/deyatelnost/>
5. Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью / В. В. Москвичев, И. В. Бычков, В. П. Потапов [и др.] // Вестник Российской академии наук. – 2017. – Т. 87, № 8. – С. 696-705.
6. К вопросу определения частоты аварийных ситуаций на объектах, осуществляющих деятельность с использованием пожаровзрывоопасных и аварийно химически опасных веществ./ В.Ю. Востоков // Проблемы анализа риска. – 2007. – Т. 4, № 4. – С. 413-418.

### References

1. IAEA-TECDOC-727. ISSN 1011-4289. Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries. – Vienna: IAEA, 1993
2. Decree of the President of the Russian Federation No. 642 dated 01.12.2016; As amended by Decree of the President of the Russian Federation No. 143 dated 15.03.2021
3. Express methodology for assessing the risk of accidents at hazardous production facilities – warehouses of fuels and lubricants / E.E. Nevskaya, D.V. Degtyarev, M.V. Lifanov, V.S.[etc.]// Occupational safety in industry. – 2016. – №. 3. – p. 62-68.
4. ROSTRUD: Federal Service for Labor and Employment; List of employers whose activities are classified at a certain risk group on 30.06.2023/ <https://rostrud.gov.ru/rostrud/deyatelnost/>
5. Information system of territorial management of development risks and security / V. V. Moskvichev, I. V. Bychkov, V. P. Potapov [etc.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 87, №. 8. – p. 696-705.
6. On estimation of the Frequency of Emergency Situations in Activities Flammable, Explosive, and Hazardous Chemical Substances./ V.Yu. Vostokov // Problemy analiza riska. 2007. Vol. 4, №4. p. 413-418.

УДК 57.013, 57.014

**ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА «ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА 8К-14»**

Е. Г. Смирнов, Л. А. Герасимова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: lyu-gerasimova@yandex.ru

*Проведена оценка экологичности оборудования, используемого для подготовки специалистов ракетно-космической отрасли. Рассмотрены аспекты воздействия на экологические среды, излучения, отходность при изготовлении и работе учебного стенда.*

*Ключевые слова: экологичность, демонстрационный стенд, воздействие на окружающую среду, отходность.*

**ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF THE PRODUCTION AND OPERATION  
OF THE DEMONSTRATION STAND "PNEUMOHYDRAULIC SYSTEM 8K-14"**

E. G. Smirnov, L. A. Gerasimova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: lyu-gerasimova@yandex.ru

*An assessment of the environmental friendliness of the equipment used to train specialists in the rocket and space industry was carried out. The aspects of the impact on environments, radiation, waste during the manufacture and operation of the training stand are considered.*

*Keywords: environmental friendliness, demonstration stand, environmental impact, waste.*

Экологичность оборудования, используемого при подготовке специалистов технических специальностей, демонстрирует возможность баланса высокой технологичности и минимизации воздействий на окружающую среду. Проведение обучения специалистов ракетно-космической отрасли требует переноса теоретических знаний на практическую деятельность. Инструментом может послужить демонстрационный стенд с цифровым управлением, на котором будет наглядно и доступно представлена работа систем комплекса пневмогидравлических агрегатов. Создание и эксплуатация демонстрационного стенда «Макет 8К-14», имитирующего пневмогидравлическую систему с цифровым управлением, происходит в контакте с окружающей средой создавая некоторые экологические воздействия, поэтому важны требования, предъявляемые к оборудованию, которые позволят контролировать опасные факторы, воздействующие на окружающую среду.

Так как одним из этапов изготовления демонстрационного стенда является пайка, то сам процесс сопровождается загрязнением атмосферы частицами и аэрозолями канифоля и припоя. В состав припоя может входить олово и свинец, разного процентного соотношения в зависимости от марки, которые оказывают негативное влияние при пайке из-за выделяющихся паров. Канифоль также при больших концентрациях может оказывать отравляющее воздействие на биообъекты.

При ручной пайке использовалась марка припоя ПОС-40 (олово – 40%, свинец – 60%) и паяльная станция мощность от 20Вт до 40Вт. В таблице 1 приведены компоненты пайки и их предельно допустимая концентрация в помещении.

Таким образом, в помещении при проведении паяльных работ концентрация самого опасного вещества – свинца, в воздухе не превышает ПДК установленного гигиеническими нормативами, утвержденными Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации от 2003г (ГН

2.2.5.1313-03) [1]. Другие компоненты также находятся в пределах нормы, поэтому нет необходимости в дополнительной вентиляции помещения.

Таблица 1

**Перечень ПДК и фактические концентрации компонентов пайки**

Наименование вещества	Рассчитанная концентрация вредных веществ, мг/м <sup>3</sup>	ПДК (мг/м <sup>3</sup> )	Класс опасности (меньше – опаснее)
Свинец	0,025	0,05	1
Олово	0,047	0,2	3
Канифоль	1,96	80 – 1000	4

На лицевой стороне демонстрационного стенда использовались окрасочные материалы в виде перманентных маркеров, имеющие вредные вещества в своем составе, например изопропиловый спирт, при превышении которого может оказывать негативное влияние на биообъект. На лицевую часть наносится окрасочное покрытие маркера площадью 240 см<sup>2</sup> и в течении 18 минут прорисовывается контур рисунка. Скорость испарения составит 110,43 мг/м<sup>2</sup>с, при этом концентрация паров определяется как 9,93 мг/м<sup>3</sup>, при допустимой концентрации паров изопропилового спирта в воздухе рабочего помещения – 10 мг/м<sup>3</sup> и согласно ГОСТ 9805-84 [2] расчетные значения находятся в пределах нормы, но близко к критическому значению.

На демонстрационном стенде присутствуют блоки с проводами и электронными компонентами, которые при работе не выделяют газовые компоненты в атмосферу. Также в оборудование не предусмотрено использование водных ресурсов, вследствие чего не происходит сброса в бытовую канализационную систему, поэтому загрязнение гидросферы отсутствует.

В работе стенда используются светодиодные адресные ленты и множество различных отдельных компонентов, которые в процессе работы создают электромагнитное излучение, также пульт управления и электропроводка могут накапливать на себе статическое электричество. Оценка составляющих электромагнитного поля приведена в таблице 2.

Таблица 2

**Составляющие электромагнитного поля демонстрационного стенда**

Вид поля	Частота	Напряженность/Плотность	ПДУ
Электромагнитное	0, 50Гц	1 В/м – 2 В/м	25 В/м
Электромагнитное	5 Гц – 2 кГц	5 В/м – 10 В/м	25 В/м
Электрическое	50 Гц	90 В/м – 110 В/м	500 В/м
Магнитное	5 Гц – 2 кГц	50 нТл – 70 нТл	250 нТл
Электростатическое	-	12 кВ/м	15 кВ/м

По данным из таблицы 2 можно сделать вывод, что составляющие электромагнитного поля, генерируемого во время работы демонстрационного стенда, находятся в пределах нормы, установленных в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ» [3]. Стенд спроектирован таким образом, что большинство его компонентов находятся в защитных приспособлениях, которые поглощают создаваемое излучение, у остальных компонентов излучение поглощается конструктивными элементами здания.

При изготовлении демонстрационного стенда применяется паяльная станция. Нагрев жала паяльника приводит к тепловому загрязнению окружающей среды. Используемая марка припоя – ПОС-40 требует определенной температуры нагрева паяльника для его плавления, которая составляет 240°С. Данная температура быстро рассеивается в окружающую среду через поверхность нагретой части, которая составляет 300мм<sup>2</sup>. Этап пайки в изготовлении стенда составляет 5 часов.

Тепловое загрязнение также может происходить из-за увеличения температуры различных элементов стенда при их работе, которые отдают тепловую энергию в окружающую среду. Работа стенда осуществляется благодаря блоку питания, который обладает высокими показателями теплового излучения, светодиодные ленты на лицевой части тоже нагреваются в процессе свечения. Так как

температура помещения поддерживается на отметке 22°C и компоненты стенда нагреваются до 45°C, то тепловое загрязнение в ходе эксплуатации стенда составляет 23°C

При разработке демонстрационного стенда применялось большое количество различных материалов и изделий. В случае окончания срока службы оборудования, повреждения или износа, следует его правильно утилизировать. Древесина, используемая в стенде, является возобновляемым строительным материалом и воздействие этих отходов на окружающую среду минимальны, однако они способны загрязнять окружающую среду за счет скопления больших объемов, поэтому материал необходимо переработать. Для защиты светодиодных лент применяются пластиковые вставки, являющиеся одним из наиболее загрязняющих материалов. Долгий процесс разложения в естественных условиях, а также выделение вредных веществ, пластик нуждается в повторной переработке, но такое сырье можно перерабатывать не более 2-3 раз, далее его качество снижается и становится не пригодным для дальнейшего применения. На стенде присутствуют электронные компоненты, провода и крепежные элементы, у которых в составе присутствуют металлы, некоторые из них при неправильной утилизации под воздействием внешней среды могут являться сильнейшими ядами. Таким образом, неправильная утилизация компонентов оборудования наносит существенный вред окружающей среде, поэтому важно его правильно утилизировать.

Важный показатель – процентное содержание компонентов, подлежащих переработке в составе сложного изделия. Экологичность стенда определяется коэффициентом безотходности, который показывает соотношение перерабатываемого материала к общей массе конструкции. Коэффициент безотходности равен 90%, такой результат соответствует высокому показателю перерабатываемости компонентов стенда и характеризует изделие, как относящееся к категории малоотходных технологий.

После проведенного анализа факторов, отказывающих негативное влияние на окружающую среду, можно сделать вывод, что стенд является экологичным как при изготовлении, так и при эксплуатации.

### Библиографические ссылки

1. ГН 2.2.5.1313-03. Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы
2. ГОСТ 9805-84 ГОСТ 9805-84. Группа Л25. Межгосударственный стандарт. Спирт изопропиловый. Технические условия.
3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».

### References

1. GN 2.2.5.1313-03. *Himicheskie faktory proizvodstvennoj sredy. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vrednyh veshchestv v vozduhe rabochej zony. Gigienicheskie normativy* [Chemical factors of the production environment. Maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in the air of the working area. Hygienic standards]
2. GOST 9805-84 GOST 9805-84. Group L25. *Mezhhgosudarstvennyj standart. Spirt izopropilovyj. Tekhnicheskie usloviya.* [Interstate standard. Isopropyl alcohol. Technical conditions.]
3. SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03 «*Gigienicheskie trebovaniya k personal'nym elektronno-vychislitel'nym mashinam i organizacii rabot*» ["Hygienic requirements for personal electronic computers and organization of work"].

© Смирнов Е. Г., Герасимова Л. А., 2023

УДК 34.06 : 614.8

## «РЕГУЛЯТОРНАЯ ГИЛЬОТИНА» ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Е. В. Сугак

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: sugak@mail.ru

*Рассматриваются некоторые предварительные итоги реформы нормативного обеспечения техносферной безопасности и технического регулирования.*

*Ключевые слова: техносферная безопасность, техническое регулирование, контроль и надзор, регуляторная гильотина.*

## «REGULATORY GUILLOTINE» OF TECHNOSPHERE SAFETY

E. V. Sugak

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sugak@mail.ru

*Some preliminary results of the reform of regulatory support for technosphere safety and technical regulation are considered.*

*Keywords: technosphere safety, technical regulation, control and supervision, regulatory guillotine.*

Термин и понятие «техносферная безопасность» широко используются в наименованиях научных направлений, образовательных стандартов, конференций, монографий, учебников и учебных пособий, журналов и публикаций [1]. Однако юридическое определение этого понятия в нормативных правовых актах до сих пор отсутствует.

В научно-технической литературе понятие имеет ряд интерпретаций и, как правило, «техносферная безопасность» рассматривается как безопасность человечества в целом, включая экологическую, санитарно-гигиеническую, экономическую безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях, международных конфликтов и войнах, безопасность в повседневной и трудовой деятельности, то есть практически все виды безопасности, а нормативное обеспечение техносферной безопасности является важным аспектом национальной безопасности, защиты здоровья и безопасности населения [2].

Впервые на законодательном уровне понятие «безопасность» было установлено в 1992 году Законом РФ «О безопасности» как «состояние защищённости жизненно важных интересов личности, общества, государства от внутренних и внешних угроз». Однако в 2010 году закон утратил свою силу в связи с принятием нового Федерального закона «О безопасности», в котором понятие безопасности не установлено, а безопасность определена через предмет регулирования, основные принципы и содержание деятельности по обеспечению безопасности государства, личности, общественной, экологической и иных видов безопасности. Законодатель, по сути, предложил решать вопрос о понятии «безопасность» с помощью отраслевых правовых актов.

Только в 2021 году в «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» понятие национальной безопасности вновь определено как «состояние защищённости национальных интересов Российской Федерации от внешних и внутренних угроз, при котором обеспечиваются реализация конституционных прав и свобод граждан, достойное качество и уровень их жизни, гражданский мир и согласие в стране, охрана суверенитета Российской Федерации, ее независимости и государственной целостности, социально-экономическое развитие страны». При этом под национальными интересами понимается «объективно значимые потребности личности, общества и государства в безопасности и устойчивом развитии».

К началу 2000-х годов правовое регулирование отдельных видов безопасности осуществлялось более чем 70 федеральными законами, более 200 указами Президента, около 500 постановлениями Правительства, а также другими подзаконными актами. Законодательная база носила фрагментарный характер, порождая локальные и разрозненные массивы правовых норм, касающиеся отдельных видов безопасности. Поэтому к этому времени назрела необходимость реформирования нормативного обеспечения безопасности.

Основным нормативным документом реформирования стал Федеральный закон «О техническом регулировании». Закон был принят в 2002 году в связи с интеграцией отечественной экономики с европейской, планируемым вступлением во Всемирную торговую организацию (ВТО), выполнением межгосударственных контрактов.

Проект закона был разработан в рамках гранта «Аналитическое обеспечение реформы деятельности государственных контрольных и надзорных органов (системы технического регулирования)», единственной организацией-донором которого было Агентство США по международному развитию (USAID) [3].

Закон должен был изменить всю систему технического регулирования – снизить административное и экономическое давление на производителей, устранить технические барьеры в торговле, повысить эффективность защиты рынка от опасной продукции [3]. Основные положения Закона базировались на положениях «Соглашения о технических барьерах в торговле» ВТО и на Директиве ЕС «О процедуре представления информации в области технических регламентов и стандартов».

Закон устанавливал базовые правила в сфере нормативного регулирования и применения технических регламентов с учетом степени риска причинения вреда, устанавливающие минимально необходимые требования, обеспечивающие большую часть видов безопасности.

По модели, принятой в Европе и называемой «принципами нового подхода», в технических регламентах формулируются только существенные требования к продукции, то есть такие, которые определяют минимально необходимый уровень безопасности. Конкретные же показатели, которые обязан достичь производитель чтобы выполнить требования технических регламентов, включаются в добровольные стандарты для получения продукции наилучшего качества наилучшими способами производства для того, чтобы потребителю мог быть предложен наилучший продукт в достаточном количестве и по наиболее сходной цене. Поскольку стандарты добровольны, то производитель сам выбирает, хочет он их использовать или не хочет, нужны они ему или не нужны. Стандарты должны способствовать соблюдению технических регламентов.

Первые технические регламенты были приняты лишь в 2008 году – спустя 6 лет после принятия закона. С 2011 года технические регламенты принимались в рамках Таможенного союза (ТР ТС), начиная с 2014 года принимаются Технические регламенты Евразийского экономического союза (ТР ЕАЭС). В процессе реализации «Программы разработки технических регламентов...» разработано более 230 проектов [3].

О недостатках и опасности закона, который отменил обязательность требований стандартов, специалисты предупреждали начиная с момента его принятия – отмечались противоречия внутри самого закона, отсутствие четкой методической базы разработки технических регламентов, значительные расхождения с международными и европейскими подходами (в том числе – ВТО) к установлению обязательных требований, а также игнорирование самого важного инструмента технического регулирования – стандартизации, что в итоге привело к полной деградации системы стандартизации [3-5].

Кроме того, после принятия каждого технического регламента утверждались перечни стандартов и документов в области стандартизации, «в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента». Таким образом, в результате реформы снижение административной нагрузки на производителя не произошло, а к существующим нормативным документам добавились новые – технические регламенты с целым шлейфом из десятков и сотен «добровольных» стандартов.

Второй попыткой или новым витком реформы технического регулирования и контрольно-надзорной деятельности стала «регуляторная гильотина», запущенная в 2016 году, – инструмент масштабного пересмотра и отмены нормативных правовых актов, негативно влияющих на бизнес-климат и регуляторную среду. «Регуляторная гильотина» нацелена на повышение уровня безопасности и устранение избыточной административной нагрузки на субъекты предпринимательской деятельности. Она проводится с помощью отмены неактуальных нормативных актов в сфере надзора и контроля, а также построения новой эффективной системы государственного контроля (надзора), направленной на снижение социально значимых рисков – «риск-ориентированный подход».

Первыми Федеральными законами, принятыми в рамках новой реформы, стали законы «Об обязательных требованиях» и «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации», принятые в 2020 году.

Комплекс системы риск-ориентированного подхода направлен на сокращение контрольной нагрузки на субъекты (объекты) экономики, посредством их распределения по значимости риска реализации негативных сценариев, ущерба (убытка) охраняемым законами ценностям, последствий для окружающей среды, жизни и здоровья людей, хотя в новых документах понятие риска не соответствует установленным определениям техногенного (технического) или экологического рисков и не ориентировано на обеспечение приемлемого риска.

Следует также отметить, что «регуляторная гильотина» не коснулась технических регламентов и нормативов на их основе.

Итоги «регуляторной гильотины» и реформы контрольно-надзорных органов еще не подведены – программа реформы рассчитана до 2025 года. Но промежуточные результаты показывают, что существенного снижения количества нормативно-технических документов достичь не удалось. Например, по данным сайтов «КонсультантПлюс» и Ростехнадзора по состоянию на середину 2023 года перечень правил и инструкций по охране труда в различных отраслях содержит около 400 документов, норм и правил пожарной безопасности – более 350, перечень федеральных норм и правил в области промышленной безопасности и атомной энергии – около 450 позиций, в том числе нормативных правовых актов и административных регламентов Ростехнадзора – более 280. Сокращения числа контрольно-надзорных органов также не произошло, хотя количество плановых проверок хозяйствующих субъектов существенно сократилось.

Таким образом, анализ существующего массива нормативно-правовых документов показывает следующее.

1. Необходимо принять федеральные законы о национальной безопасности с определением всех видов безопасности и о техносферной безопасности.
2. Необходимо отменить закон «О техническом регулировании» и вернуть национальным и межгосударственным стандартам статус обязательных для выполнения.
3. Разработку проектов нормативных документов по безопасности должны осуществлять специалисты в соответствующей области.

### Библиографические ссылки

1. Сугак Е. В. Современные проблемы техносферной безопасности в России // Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. – Петрозаводск: Новая наука, 2022. С. 5-85.
2. Подберёзкин А. И. Современная стратегия национальной безопасности России. М.: Международные отношения, 2023. 1594 с.
3. Пугачев С. Федеральный закон «О техническом регулировании»: двадцать лет спустя. – Стандарты и качество. 2022. № 12. С. 20-26.
4. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. – 308 с.
5. Нетес В. А., Резиновский А. Я., Тарасьев Ю. И. и др. Деградация вместо гармонизации. – Стандарты и качество, 2011. № 5. С. 40-44.

### References

1. Sugak E. V. Sovremennye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti v Rossii // Innovacionnoe razvitie nauki: fundamental'nye i prikladnye problemy. – Petrozavodsk: Novaya nauka, 2022. S. 5-85.
2. Podberiozkin A. I. Sovremennaya strategiya nacional'noj bezopasnosti Rossii. M.: Mezhdunarodnye otnosheniya, 2023. 1594 s.
3. Pugachev S. Federal'nyj zakon «O tekhnicheskom regulirovanii»: dvadcat' let spustya. – Standarty i kachestvo. 2022. № 12. S. 20-26.
4. Vorob'yov YU. L., Akimov V. A., Sokolov YU. I. Sistemnye avarii i katastrofy v tekhnosfere Rossii. M.: FGBU VNII GOCHS (FC), 2012. – 308 s.
5. Netes V. A., Rezinovskij A. YA., Taras'ev YU. I. i dr. Degradaciya vmesto garmonizacii. – Standarty i kachestvo, 2011. № 5. S. 40-44.

УДК 57.013, 57.014

**ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДА  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ  
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

М. С. Федоров, Л. А. Герасимова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: lyu-gerasimova@yandex.ru

*Проведена оценка экологичности работы учебного стенда системы управления стенда для регистрации характеристик солнечных батарей. Рассмотрены аспекты воздействия на экологические среды, излучения, отходность при работе и утилизации учебного стенда.*

*Ключевые слова: экологичность, учебный стенд, система управления стенда, воздействие на окружающую среду, отходность.*

**THE IMPACT OF THE CONTROL SYSTEM OPERATION  
OF THE STAND FOR RECORDING THE CHARACTERISTICS  
OF SOLAR PANELS ON THE ENVIRONMENT**

M. S. Fedorov, L. A. Gerasimova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: lyu-gerasimova@yandex.ru

*An assessment of the environmental friendliness of the training stand of the control system of the stand for recording the characteristics of solar panels was carried out. The aspects of environmental impact, radiation, waste during operation and utilization of the training stand are considered.*

*Keywords: environmental friendliness, training stand, stand management system, environmental impact, waste.*

Отработка функционирования отдельных узлов сложной техники связано использованием специализированных стендов конкретного профиля. И если само готовое изделие работает в реальных условиях ограниченный промежуток времени, то технические испытания и обучение персонала эксплуатационным навыкам могут длиться многократно дольше, создавая спектр факторов экологической направленности, таких как воздействие на атмосферу и гидросферу, тепловое излучение, электромагнитное поле, твердые отходы.

Проведена оценка экологичности эксплуатации системы управления стенда для регистрации характеристик солнечных батарей.

Состав воздуха в ходе работы стенда не меняется, так как никаких химических реакций во время работы системы управления стенда не происходит, таким образом, загрязнение воздуха отсутствует.

В ходе эксплуатации устройства загрязнение гидросферы не происходит, так как вода не используется, не производится сброса загрязненной воды в промышленную и бытовую канализацию.

При эксплуатации стенда могут возникать электромагнитные помехи в диапазоне от 0.02 кГц – 2 кГц. Напряжённость в этом случае равна 150 – 155 В/м, а ПДУ равен 500 В/м. [1] Так как напряжённость электромагнитного поля не превышает предельно-допустимых значений, установленных ГОСТ 12.4.124-83 [2], а устройство установлено в помещении, то излучение поглощается конструктивными элементами и не выходит за пределы здания. Таким образом, данный фактор не оказывает существенного влияния на окружающую среду.

В ходе эксплуатации стенда происходит тепловое загрязнение атмосферы в результате выброса тепловой энергии, так как в процессе работы устройства происходит нагрев его комплектующих. [3] Тепловое загрязнение атмосферы от работы элементов одного устройства составляет до 26 °С. При работе нескольких подобных устройств в одном помещении или на ограниченной площади, тепловое загрязнение будет вполне ощутимым, хоть и локальным. Таким образом, учебный стенд будет вносить свой вклад в формирование микроклимата в помещении, а при активном использовании подобного оборудования, и в изменении температурных характеристик городской урбоэкосистемы.

После своего морального или физического износа стенд подлежит утилизации. Составные детали системы управления стенда состоят, в основном, из пластика и металла. В настоящих условиях в изделиях такого типа перерабатывается только металл. Системы управления стенда подлежат повторной переработке на 45 %, что относит данное оборудование к высокоотходной категории. Снизить отходность возможно при внедрении недорогих методов переработки пластика. Обращение с отходами I-V класса опасности, к которым относятся не утилизируемые материалы деталей стенда регулирует Федеральный закон от 24 июня 1998 г. N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления" (с изменениями и дополнениями) и критерии отнесения отходов к классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду. [4, 5]

В результате анализа факторов, вызывающих загрязнение окружающей среды при эксплуатации учебного стенда для регистрации характеристик солнечных батарей, можно сказать, что наибольшее влияние на окружающую среду оказывают образующиеся твердые отходы при утилизации системы управления стенда.

#### Библиографические ссылки

1. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».
2. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. «Средства защиты от статического электричества». 01.01.84
3. Федеральный закон "Об охране атмосферного воздуха" от 04.05.1999 N 96-ФЗ (последняя редакция) 4 мая 1999 года N 96-ФЗ
4. Федеральный закон от 24 июня 1998 г. N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления"
5. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 4 декабря 2014 г. N 536 "Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду"

#### References

1. SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03 «*Gigienicheskie trebovaniya k personal'nyim elektronno-vychislitel'nyim mashinam i organizacii rabot*» ["Hygienic requirements for personal electronic computers and organization of work"]
2. Interstate standard. *Sistema standartov bezopasnosti truda. «Sredstva zashchity ot staticheskogo elektrichestva»* [The system of occupational safety standards. "Means of protection against static electricity"]. 01.01.84
3. Federal Law "*Ob ohrane atmosfernogo vozduha*" ["On the Protection of Atmospheric Air"] dated 04.05.1999 N 96-FZ (last edition) on May 4, 1999 N 96-FZ
4. Federal Law No. 89-FZ of June 24, 1998 "*Ob othodah proizvodstva i potrebleniya*" ["On Production and Consumption Waste"]
5. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 536 dated December 4, 2014 "*Ob utverzhdanii Kriteriev otneseniya othodov k I-V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu*" ["On approval of Criteria for Assigning Waste to Hazard Classes I-V according to the degree of negative impact on the environment"]

© Федоров М. С., Герасимова Л. А., 2023

УДК 621.628

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ СОРБЕНТА ОТ РАЗМЕРА ЕГО ФРАКЦИИ

А. В. Хилюк

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: h-anna7@bk.ru

*Отрасль машиностроения в том числе ракетно-космическая отрасль, является одним из источников загрязнения гидросферы ионами тяжелых металлов. Для решения данной задачи, применяются различные методы очистки, обладающие различными характеристиками. Для удаления ионов металлов возможно применение комбинированных методов, включающих электрохимическую очистку.*

*В статье представлена зависимость поверхностного заряда от применяемой фракции кварцевого песка при проведении процесса очистки совмещенным методом, включающим адсорбционную и электрохимическую составляющую.*

*Ключевые слова: совмещенный метод, поверхностный заряд, степень очистки, сорбент, адсорбция.*

## DEPENDENCE OF THE SORBENT POLARIZATION ON THE SIZE OF ITS FRACTION

A. V. Khilyuk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: h-anna7@bk.ru

*The engineering industry, including the rocket and space industry, is one of the sources of pollution of the hydrosphere with heavy metal ions. To solve this problem, various cleaning methods with different characteristics are used. To remove metal ions, it is possible to use combined methods, including electrochemical purification.*

*The article presents the dependence of the surface charge on the applied fraction of quartz sand during the cleaning process by a combined method, including an adsorption and electrochemical component.*

*Keywords: combined method, surface charge, degree of purification, sorbent, adsorption.*

### **Введение.**

В машиностроительном производстве, в том числе производстве ракетно-космической техники применяются технологии, в результате которых происходит насыщение сточных вод ионами тяжелых металлов [1]. Поиск оптимальных решений проблемы обезвреживания производственных сточных вод является одной из наиболее значимых по влиянию на экологическую обстановку в водных бассейнах России [2,3].

### **Результаты исследований.**

При совмещенном методе очистки воды, включающем в себя одновременно проходящую адсорбцию и электрохимическое воздействие с последующим отстаиванием, наблюдается увеличение степени адсорбционной очистки за счет явления поляризованности [4,5].

При помещении частиц диэлектрика (кварцевого песка) в электрическое поле, происходит поляризованность и в результате создается поверхностная плотность зарядов, способствующая увеличению адсорбционной составляющей процесса очистки.

Увеличение дисперсности кварцевого песка способствует повышению электростатического заряда на поверхности зерен, следовательно повышает их адсорбционные свойства. В связи с этим проведен

анализ различных фракций кварцевого песка при использовании совмещенного метода очистки сточных вод.

На рис.1 представлены результаты опытов, показывающие изменение поверхностного заряда в зависимости от применяемой фракции кварцевого песка.

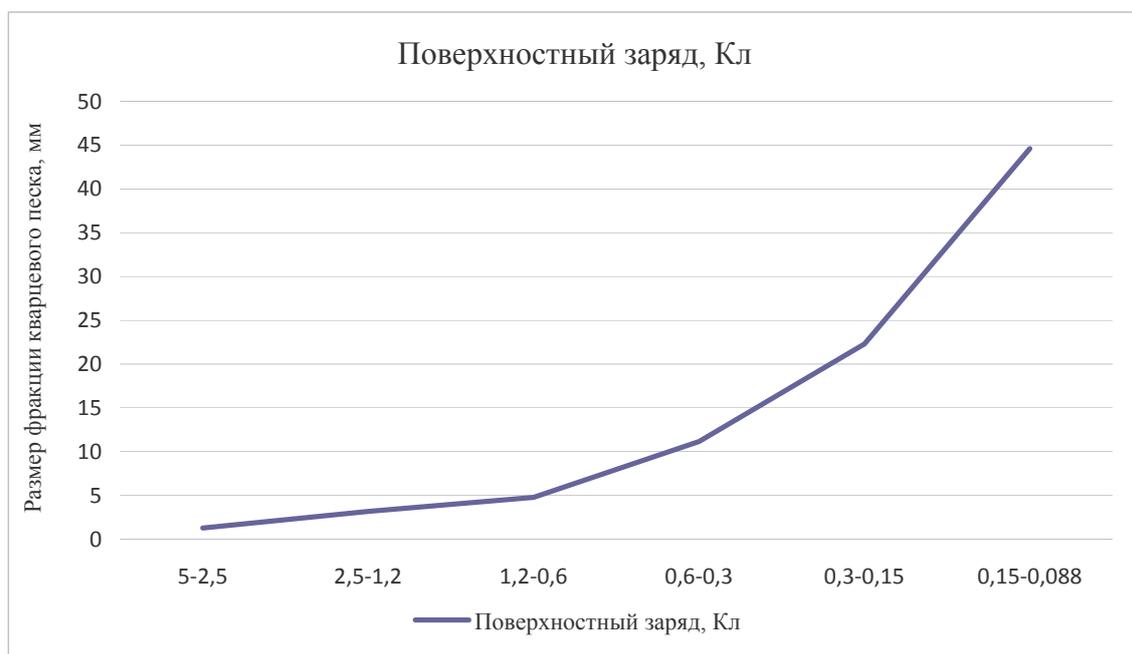


Рис.1 Изменение поверхностного заряда в зависимости от применяемой фракции кварцевого песка  
Fig. 1 Change of the surface charge depending on the quartz sand fraction used

### Заключение.

Увеличение адсорбционной составляющей процесса очистки возможно лишь при воздействии на адсорбент (кварцевый песок) электрического поля, что создает эффект поляризации. Оптимальным диапазоном выбора размера фракций для достаточной поляризации является размер от 0,15 до 0,6 мм.

### Библиографические ссылки

1. Исхакова, И. О. Инновационные методы очистки сточных вод современного гальванического производства / И. О. Исхакова, В. Э. Ткачева // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 10. – С. 143-146. – EDN VXPEYN.
2. Золотокопова, С. В. Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в мышцах гидробионтов реки Шерепок (Вьетнам) / С. В. Золотокопова, Х. К. Чан, Т. К. Нго // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 118-123. – DOI 10.24143/2073-5529-2018-1-118-123. – EDN YSOZLF.
3. Бугаев Л.А., Войкина А.В., Валиуллин В.А., Смыр Т.М., Карпушина Ю.Э. Исследование накопления пестицидов в печени некоторых видов промысловых рыб Азовского моря в 2009–2011 гг. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 07 (81). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/66.pdf>
4. Хамалетдинова Н. М., Кузнецова О. В., Егорочкин А. Н. [и др.] Поляризационный эффект при сорбции и удерживании сорбатов в газовой хроматографии // Журнал физической химии. 2009. Т. 83, № 8. С. 1553-1557. – EDN KUERPН.
5. Юсупова Рамазанова, А. А. Электросорбция соединений бора на активированных углях. Адсорбция бора на поляризованном активированном угле КМ-2 / А. А. Юсупова Рамазанова, Д. А. Свешникова, А. Ш. Рамазанов // Вестник Дагестанского государственного университета. – 2006. – № 1. – С. 38-44. – EDN MEGXUT.

### References

1. Iskhakova, I. O. Innovatsionnye metody oчитki stochnykh vod sovremennogo gal'vanicheskogo proizvodstva / I. O. Iskhakova, V. E. Tkacheva // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. – 2016. – Т. 19, № 10. – S. 143-146. – EDN VXPEYH.
2. Zolotokopova, S. V. Sravnitel'nyy analiz nakopleniya tyazhelykh metallov v myshtsakh gidrobiontov reki Sherepok (V'etnam) / S. V. Zolotokopova, Kh. K. Chan, T. K. Ngo // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo. – 2018. – № 1. – S. 118-123. – DOI 10.24143/2073-5529-2018-1-118-123. – EDN YSOZLF.
3. Bugaev L.A., Voykina A.V., Valiullin V.A., Smyr T.M., Karpushina Yu.E. [Investigation of the accumulation of pesticides in the liver of some commercial fish species of the Sea of Azov in 2009–2011.]. *Politematicheskyy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyy zhurnal KubGAU)*. 2012. No. 07 (81) (In Russ.). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/66.pdf> (accessed 30.08.2023).
4. Khamaletdinova N. M., Kuznetsova O. V., Egorochkin A. N. [i dr.] Polyarizatsionnyy effekt pri sorbtsii i uderzhivanii sorbatov v gazovoy khromatografii // Zhurnal fizicheskoy khimii. 2009. Т. 83, № 8. S. 1553-1557. – EDN KUERP.
5. Yusupova Ramazanova, A. A. Elektrosorbtsiya soedineniy bora na aktivirovannykh uglyakh. Adsorbtsiya bora na polyarizovannom aktivirovannom ugle KM-2 / A. A. Yusupova Ramazanova, D. A. Sveshnikova, A. Sh. Ramazanov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2006. – № 1. – S. 38-44. – EDN MEGXUT.

© Хилюк А. В., 2023

УДК 504.054

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД «КРАСНОЯРСКОЙ ТЭЦ-1»**

Е. В. Чагарина, Е. Н. Бельская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
 E-mail: l22ena@mail.ru

*В работе проведён анализ состава сточных вод, образовавшихся в процессе деятельности Красноярской ТЭЦ-1, а также соответствие химических показателей стоков установленным нормативам.*

*Ключевые слова: теплоэлектроцентраль, сточные воды, сток, загрязняющие вещества, выбросы.*

**ANALYSIS OF WASTEWATER QUALITY AT KRASNOYARSKAYA CHPP-1**

E. V. Chagarina, E. N. Belskaia

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: l22ena@mail.ru

*The paper analyzes the composition of wastewater generated in the process of Krasnoyarsk CHPP-1, as well as the compliance of chemical indicators of stocks with the established standards.*

*Keywords: combined heat and power plant, wastewater, stock, pollutants, emissions.*

В настоящее время антропогенные загрязнения водных экосистем являются одной из актуальных проблем. Неконтролируемый сброс сточных вод крайне негативно сказывается на состоянии речных пространств, условиях городской среды и приводит к ухудшению рекреационных качеств водной среды [1]. В качестве превентивных мер необходимо проводить своевременный контроль и мониторинговые исследования сбрасываемых сточных вод для обеспечения возможности управления их качеством.

Красноярская ТЭЦ-1 разрабатывает и утверждает программы производственного экологического контроля, в том числе планы-графики контроля качества выбросов и сбросов загрязняющих веществ [2]. Предприятие обеспечивает проведение наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха, мониторинга состояния водоемов, программы мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду.

Для исследования были использованы сведения о составе и качестве исходной и сточной вод АО «Красноярская ТЭЦ-1» за январь, февраль и март 2021 года. Общий объем забираемой воды на производственные нужды за 1 квартал 2021 года составил 20295625 м<sup>3</sup>, в то время как объем сточных вод 18874164 м<sup>3</sup> [3]. Усредненные химические показатели сточной воды за I квартал 2021 представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Химические показатели сточной воды Красноярской ТЭЦ-1 на I квартал 2021 года, мг/дм<sup>3</sup>**

Нефте-продукты	ВВ	Сульфаты	Медь	Железо	Марганец	Цинк	Алюминий	Фенолы
0,044	1,4	12,7	0,0022	0,0038	0,0062	0,0061	0,038	<0,0005

Наблюдения за качеством используемой и сточной воды Красноярской ТЭЦ-1 проводятся регулярно. При оценке качества измеряются такие показатели, как температура воды, интенсивность запаха, мутность и т. д. Также пробы воды исследуются на наличие патогенных бактерий, цист патогенных кишечных простейших, а также яиц и личинок гельминтов. По данным за I квартал 2021 года вышеперечисленные явления обнаружены не были. Помимо изучения химического состава воды была оценена токсичность проб. Результаты показали, что БКР (безвредная кратность разбавления) = 1, что говорит об отсутствии острого токсического действия.

При исследованиях проб сбрасываемых вод полученные концентрации различных веществ, в обязательном порядке, сравниваются с допустимыми концентрациями в сточной воде [4]. В таблице 2 приведены результаты сравнительного анализа фактических концентраций веществ с допустимыми, за период с января по март 2021 года.

Таблица 2

**Фактические концентрации веществ в сточной воде за 1 квартал 2021 года**

Показатель, ед. измерения	Допустимая концентрация на сбросе	Концентрация в сточной воде		
		Январь	Февраль	Март
Водородный показатель рН, ед. рН	6,5-8,5	8,3	8,3	8,2
ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	14,0	11,8	11,4	11,9
БПК <sub>полн.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	1,2	1,0	1,0	1,1
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,052	0,047	0,045	0,039
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	6,18	1,0	1,4	1,7
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	10,7	<b>13,1</b>	<b>12,4</b>	<b>12,7</b>
Медь, мг/дм <sup>3</sup>	0,001	<b>0,0022</b>	<b>0,002</b>	<b>0,0023</b>
Железо, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	0,027	0,041	0,046
Марганец, мг/дм <sup>3</sup>	0,006	0,0054	<b>0,0064</b>	<b>0,0069</b>
Цинк, мг/дм <sup>3</sup>	0,01	0,0069	0,0054	0,0059
Алюминий, мг/дм <sup>3</sup>	0,02	<b>0,034</b>	<b>Менее 0,04</b>	<b>Менее 0,04</b>
Фенолы, мг/дм <sup>3</sup>	0,001	Менее 0,0005	Менее 0,0005	Менее 0,0005

\* ХПК (химическое потребление кислорода) характеризует обобщенную величину кислорода, требующуюся для окисления органических соединений, содержащихся в сточных водах, химическим путем; БПК<sub>полн.</sub> – показатель полного завершения процесса окисления, обычно «полный период времени» равен двадцати суткам.

Промышленные стоки, в отличие от бытовых, обладают более сложным специфическим составом. Проведенный анализ показал, что вопрос о полном соответствии качества сточных вод Красноярской ТЭЦ-1 остается открытым [5]. В результате анализа было выявлено, что фактические концентрации сульфатов, марганца, меди и алюминия систематически превышают допустимые значения. В целом качество выбросов от производственной деятельности предприятия остается удовлетворительным. Однако обнаруженные превышения допустимых концентраций показывают необходимость дополнительной очистки стоков.

Для подбора наиболее эффективной схемы очистки стоков требуется тщательное и систематическое исследование поступающих сточных вод по ряду характеристик, включая БПК и ХПК, а также анализ их состава, который раскрывает полную информацию о протекающих биохимических процессах.

### Библиографические ссылки

1. Колесников, Е. Ю. Оценка воздействия на окружающую среду. Экспертиза безопасности : учебник и практикум для вузов: [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/bcode/468928> (дата обращения 02.09.2023г.)
2. Сибирская генерирующая компания. Экологическая политика предприятия [Электронный ресурс]. URL: <https://sibgenco.ru/main/ecology/> (дата обращения 06.09.2023г.)
3. Сибирская генерирующая компания. Красноярская ТЭЦ-1. О предприятии. [Электронный ресурс]. URL: <https://sibgenco.ru/main/company/generation/krasnoyarskaya-tets-1/> (дата обращения 06.09.2023г.)
4. Российская Федерация. Законы. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 декабря 2020г. №1118 «Об утверждении методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей» (ред. 17.05.2021). [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/400165060/> (дата обращения 05.09.2023г.)
5. Новости SGK. SGK создала запас прочности для очистных сооружений в Красноярске на 50 лет. SGK Онлайн [Электронный ресурс]. URL: <https://sibgenco.online/news/element/sgk-sozdala-zapas-prochnosti-dlya-ochistnykh-sooruzheniy-v-krasnoyarske-na-50-let/> (дата обращения: 06.09.2023г)

### References

1. Kolesnikov, E. Yu. Environmental Impact Assessment. Safety expertise : textbook and practice for universities: [Electronic resource]. URL: <https://urait.ru/bcode/468928> (accessed on 02.09.2023).
2. Siberian Generating Company. Environmental policy of the enterprise [Electronic resource]. URL: <https://sibgenco.ru/main/ecology/> (accessed on 06.09.2023).
3. Siberian Generating Company. Krasnoyarsk CHPP-1. About the enterprise. [Electronic resource]. URL: <https://sibgenco.ru/main/company/generation/krasnoyarskaya-tets-1/> (accessed on 06.09.2023).
4. Russian Federation. Laws. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation from December 29, 2020g. №1118 "On approval of the methodology for the development of standards of permissible discharges of pollutants into water bodies for water users" (accessed on 17.05.2021). [Electronic resource]. URL: <https://base.garant.ru/400165060/> (date of circulation 05.09.2023).
5. News of SGK. SGK has created a safety margin for treatment facilities in Krasnoyarsk for 50 years. SGK Online [Electronic resource]. URL: <https://sibgenco.online/news/element/sgk-sozdala-zapas-prochnosti-dlya-ochistnykh-sooruzheniy-v-krasnoyarske-na-50-let/> (accessed on 06.09.2023)



**Секция**

**«КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО СЫРЬЯ»**

УДК 689.852.41

## ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ИСКУССТВЕННЫХ ОСТРОВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТОВ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Н. А. Абрамов, И. Р. Михайлов, С. Н. Долматов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nikitabrams@mail.ru

*В статье представлен технологический анализ существующих технологий строительства искусственных островов в разных странах мира. Предложена идея строительства искусственных островов с применением древесных модулей.*

*Ключевые слова: Остров, развитие, разработка, отходы, дерево.*

## TECHNOLOGY FOR THE CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL ISLANDS WITH THE USE OF PACKAGES MADE OF WOOD WASTE

N. A. Abramov, I. R. Mikhailov, S. N. Dolmatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nikitabrams@mail.ru

*The article presents a technological analysis of existing technologies for the construction of artificial islands in different countries of the world. The idea of building artificial islands using wood modules is proposed.*

*Keywords: Science, development, development, increase, student.*

Согласно литературному источнику [1] общий объем воды на Земле насчитывается около 1,387 млрд км<sup>3</sup> это приблизительно 70% от общей площади планеты Земля. С каждым годом происходит увеличение роста городов этот процесс называется «урбанизация», таким образом необходимо увеличивать площадь суши. Этот вопрос был актуальным на протяжении многих столетий, однако люди придумали технологию строительства искусственных островов еще в 1634 году. Тогда построили первый искусственный остров «Дэдзима», он был построен в Японии 1634 году и использовался как порт для базирования морских судов.

**Цель исследования:** Разработка технологии строительства искусственных островов с применением древесных модулей.

### **Задачи:**

- 1) Проанализировать существующие технологии строительства искусственных островов.
- 2) Выявить основные достоинства и недостатки существующих технологий.
- 3) Обосновать гипотезу строительства искусственных островов с применением древесных модулей.

Согласно статистическим данным на 2022 год первым государством по строительству искусственных островов является государства Объединенных Арабский Эмиратов (ОАЭ), там насчитывается около 8 искусственных островов. Существует множество технологий строительства искусственных островов, но их применение зависит, начиная от географического местоположения заканчивая строением тектонических плит.

Согласно литературным данным [2] существуют 2 способа строительства искусственных островов с помощью отсыпки насыпи с использованием различных грунтов и металлоконструкций.

Традиционный метод строительства искусственных островов состоит из ряда операций, таких как:

- А. Отсыпка площади от береговой линии до места расположение острова
- Б. Транспортировка обломочного материала к месту размещение острова
- В. На протяжении всего времени строительства острова задействуется строительная техника в «больших» единицах.

Г. После формирования острова, восстанавливается береговой грунт и возобновляется работа острова.

В данной технологии строительства есть ряд существенных недостатков, которые приводят к негативному влиянию на окружающую среду такие как: нарушение циркуляции прибрежных течений, уменьшение питательной оболочки биоценоза моря, загрязнение гидросферы. Так же естественной проблемой возникает усадка искусственного грунта с истечением времени. Согласно литературным данным [3] Японский остров Осаком, который был построен 1960 году для увеличения пропускного режима аэропорта Кинки, за 5 лет существования данного острова, его осадка составила 8 метров. После обнаружения этой проблемы, было принято решение о строительстве дополнительного искусственного острова, который бы разгрузил и уменьшил нагрузку на рельеф острова Осаком.

Предлагаемая нами технология заключается в применении модулей из лесосечных отходов в строительстве искусственных островов. Согласно научной литературе [3] пакет из лесосечный отходов состоит из остатков после вырубки лесосеки, спрессованные при помощи харвестера биомассы John Deere 1490D. Согласно литературному источнику [4] харвестер биомассы представляет собой оборудование, которое может собирать и прессовать отходы лесосек в пакет, который удобно транспортировать и использовать по необходимости.

Технология строительства заключается в следующих этапах, таких как:

1. В морской грунт забуриваются металлические сваи.
2. Далее в виде «прямоугольного контура» укладываются деревянные модули на сваи на рис. 1 наглядно показана конструкция.
3. По всему контуру будущего острова возводится «подводная стена из древесных модулей», которая обеспечивает жесткость конструкции.
4. Следующий этап заключается в отсыпке грунтом по всему периметру будущего искусственного острова.

На рис. 1 показана схема формирования «древесно-модульного прямоугольного контура»

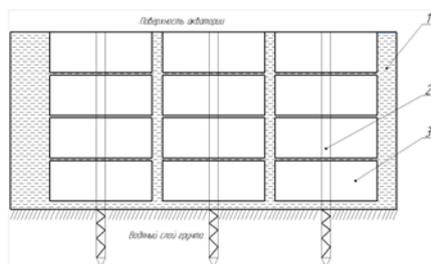


Рисунок 1 формирование древесных модулей  
(вид сбоку)

1-Водная оболочка, 2-Металлические сваи, 3-Модуль из древесных отходов

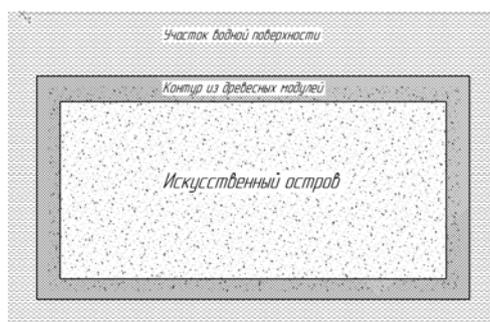


Рисунок 2-формирование искусственного острова  
с применением древесных модулей (вид сверху)

Контур из древесных модулей увеличивает стойкость грунта, а также уменьшает скорость потока течения воды, благодаря чему [5] происходит уменьшение сопротивления древесными отходами, тем самым это позволит уменьшить осадку основного рельефа местности искусственного острова.

Подводя итоги, можно сказать, что все способы, строительства искусственных островов, имеют определенные достоинства и недостатки, однако они наносят вред окружающей среде. Предлагаемая нами технология способна уменьшить объем лесосечных отходов на лесосеке, после вырубки, а так же сократить показатели ухудшение экологии.

### Библиографический ссылки

1. Андреев, И. Н. Учет движения оборудования в системе "Росаводор" 3./ И. Н. Андреев // Новые информационные технологии в науке : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Челябинск, 29 декабря 2017 года. Том Часть 3. – Челябинск: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2017. – С. 6-9. – EDN YBVXIT.
2. Долматов, С. Н. Анализ технологий дорожного строительства в условиях Крайнего Севера / С. Н. Долматов, Н. А. Абрамов // Машиностроение: новые концепции и технологии: Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 22 октября 2021 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 79-82. – EDN THATOR.
3. В.М. Дербин Технология работы харвестера при выборочных рубках// Северный федеральный университет имени М.В. Ломоносова. (г. Архангельск).
4. Михайлов, И. Р. Лесосечные отходы – как строительный материал в ландшафтном строительстве / И. Р. Михайлов, Н. А. Абрамов, С. Н. Долматов // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Красноярск, 26 ноября 2021 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 296-299. – EDN EOBYHX.
5. Электронный источник: [https://dzen.ru/a/X\\_1r6a7vPHgpp101](https://dzen.ru/a/X_1r6a7vPHgpp101)

### References

1. Andreev, I. N. Uchet dvizheniya oborudovaniya v sisteme "Rosavodor" 3./ I. N. Andreev // Novye informatsionnye tekhnologii v nauke : sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Chelyabinsk, 29 dekabrya 2017 goda. Tom Chast' 3. – Chelyabinsk: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy", 2017. – S. 6-9. – EDN YBVXIT.
2. Dolmatov, S. N. Analiz tekhnologii dorozhnogo stroitel'stva v usloviyakh Krainego Severa / S. N. Dolmatov, N. A. Abramov // Mashinostroenie: novye kontseptsii i tekhnologii: Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Krasnoyarsk, 22 oktyabrya 2021 goda. – Krasnoyarsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva", 2021. – S. 79-82. – EDN THATOR.
3. V.M. Derbin Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh// Severnyi federal'nyi universitet imeni M.V. Lomonosova. (g. Arkhangel'sk).
4. Mikhailov, I. R. Lesosechnye otkhody – kak stroitel'nyi material v landshaftnom stroitel'stve / I. R. Mikhailov, N. A. Abramov, S. N. Dolmatov // Tekhnologii i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva : Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Krasnoyarsk, 26 noyabrya 2021 goda. – Krasnoyarsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva", 2022. – S. 296-299. – EDN EOBYHX.
5. Elektronnyi istochnik: [https://dzen.ru/a/X\\_1r6a7vPHgpp101](https://dzen.ru/a/X_1r6a7vPHgpp101)

УДК 630.81

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ

Е. В. Акинина\*, Д. В. Дук, С. Г. Елисеев, В. Н. Ермолин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: eugeniya.mitina@yandex.ru

*Статья посвящена исследованию способов локального изменения проницаемости древесины березы с помощью побурения. В ходе исследования проведен эксперимент по определению влияния биологических факторов на процесс развития побурения в древесине. Установлено, что снижение проницаемости в древесине березы, прежде всего, обусловлено раневой реакцией.*

*Ключевые слова: древесина, береза, проницаемость, побурение, глубокое окрашивание.*

## INVESTIGATION OF WAYS TO CHANGE THE PERMEABILITY OF BIRCH WOOD

E. V. Akinina\*, D. V. Duk, S. G. Eliseev, V. N. Ermolin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: eugeniya.mitina@yandex.ru

*The article is devoted to the study of methods of local changes in the permeability of birch wood by browning. In the course of the study, an experiment was conducted to determine the influence of biological factors on the development of browning in wood. It has been established that the decrease in permeability in birch wood is primarily due to a wound reaction.*

*Keywords: wood, birch, browning, permeability, deep staining.*

Береза является одной из самых распространенных лиственных пород на территории РФ. Древесина данной породы имеет сравнительно высокие физико-механические свойства, и достаточно широко используется в производстве материалов и изделий из древесины.

В свежесрубленной древесине березы во время хранения при положительных температурах, формируется ненормальная окраска – побурение, которое проходит вдоль волокон древесины от торцов к центру сортимента [1]. Побурение заболонной древесины при ее отмирании после рубки дерева является аналогичным раневой реакции процессом и относится к порокам древесины. Побурение древесины березы имеет ярко красновато-бурый и рыжеватобурый цвет, но быстро бледнеет на воздухе, становясь лилово-бурым [2, 3]. Образовывающиеся в ходе побурения окрашенные вещества, приводят к закупорке водопроводящих путей, которые снижают проницаемость древесины [4]. Такая древесина становится почти непроницаемой для жидкостей. Данную особенность древесины с побурением в работе [5] было предложено использовать для формирования искусственной текстуры за счет управляемого изменения локальной проницаемости древесины березы. Формирование участков с различной проницаемостью в указанной работе обеспечивается за счет удаления свободной воды из сосудов на участках древесины планируемых к пропитке. Проникающий в древесину кислород приводит к быстрой гибели живых паренхимных клеток сообщающихся с сосудами, и древесина сохраняет свою проницаемость.

Из литературных данных известно, что одновременно с раневой реакцией живых древесных клеток как ответная реакция на попадание в древесину воздуха, не меньший вклад в формирование побурения вносит заражение древесины грибами [1]. Учитывая то, что побурение в древесине березы распространяется преимущественно вдоль волокон, было выдвинуто предположение, что ограничение возможности заражения отдельных участков торцов древесины грибами также как и продувка древесины может обеспечить сохранение проницаемости древесины на отдельных участках.

В целях исследования влияния биологических факторов на процесс развития побурения в древесине, нами были проведены экспериментальные исследования. Для этого были заготовлены четыре

неокоренных чурака древесины березы длиной 300 мм и диаметром 100 мм, которые в зависимости от метода подготовки были разделены на две группы.

На отдельные участки торцов свежизготовленных образцов первой группы с одной стороны с помощью трафарета и кисти наносился антисептирующий состав NEOMID Tor Plus (рис. 1а), а на второй торец для гидроизоляции краска ПФ-115. В качестве контроля использовались образцы второй группы, где была произведена продувка отдельных участков древесины воздухом в соответствии с описанной методикой [5]. Для этого при помощи воздушного иньектора (рис. 1б) по заранее спроектированной схеме в торцовую поверхность образца на глубину 20 мм внедрялся иньектор с диаметром отверстия 10 мм. Затем через иньектор под давлением 0,6 МПа в древесину подавался воздух. Продувка древесины продолжалась до тех пор, пока на противоположном торце образца не прекращала выделяться вода.

Подготовленные образцы помещались в биологический термостат СТ 1/80 СПУ, где выдерживались в течении 30 дней при температуре 30 °С и влажности воздуха 90 %. Затем чураки распиливались на прямоугольные образцы и пропитывались текстильным красителем для проявления проницаемых и непроницаемых участков. Пропитка образцов проводилась в автоклаве при давлении 0,4 МПа в течение одного часа.

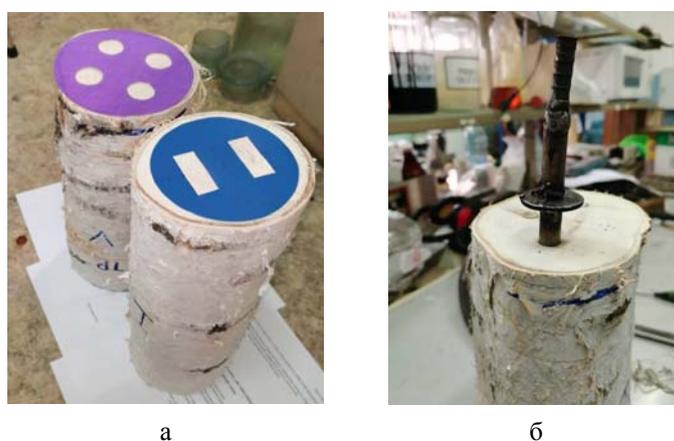


Рис. 1. Формирование локальных участков на торце образцов за счет:  
а – нанесения антисептика; б – продувки воздухом

Результаты проведенного эксперимента показали, что локальные проницаемые участки сформировались только в контрольной группе образцов, которые подготавливались локальной продувкой воздуха (рис. 2а).

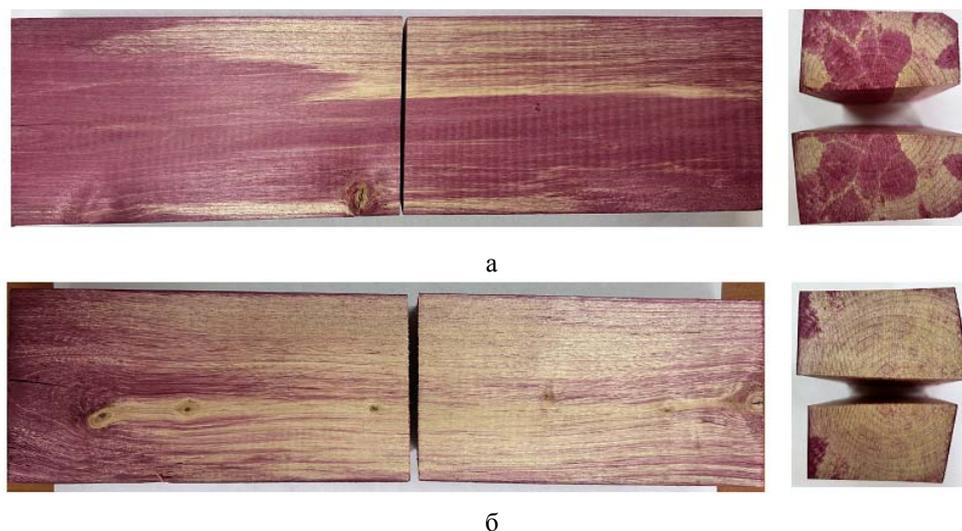


Рис. 2. Образцы, пропитанные красителем:  
а – подготовленный локальной продувкой воздуха (вдоль и поперёк волокон);  
б – локально обработанный антисептиком (вдоль и поперёк волокон)

Все образцы первой группы, подготовленные с использованием антисептика, показали равномерное протекание побурения и снижение проницаемости древесины по всему сечению (рис. 2б).

Из полученных данных следует, что снижение проницаемости древесины березы и развитие побурения, прежде всего, обусловлено раневой реакцией, вызванной проникновением воздуха. Предложенный способ формирования локальных проницаемых участков за счет использования антисептиков не подтвердил свою эффективность.

#### Библиографические ссылки

1. Вакин А. Т., Полубояринов О. И., Соловьев В. А. Пороки древесины. М.: Лесная промышленность, 1980.
2. Чураков, Б. П. Лесная фитопатология: учебник. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/210812> (дата обращения: 02.09.2023)
3. Федоров, Н. И. Лесная фитопатология. Минск: Вышэйш. шк., 1987. 177 с.
4. Соловьев В. А. Дыхательный газообмен древесины. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 300 с.
5. Пат. 2773657 Российская Федерация, МПК В27К 3/08. Способ локального окрашивания древесины / Ермолин В. Н., Елисеев С. Г., Намятов А. В., Митина Е. В. № 2021121274 : заявл. 16.07.2021 : опубл. 07.06.2022, Бюл. № 16. 7 с.

#### References

1. Vakin A. T., Poluboyarinov O. I., Solov'ev V. A. *Poroki drevesiny* [Wood defects]. M.: Lesnaya promyshlennost', 1980.
2. Churakov, B. P. Lesnaya fitopatologiya: uchebnik. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://e.lanbook.com/book/210812> (data obrashcheniya: 02.09.2023)
3. Fedorov, N. I. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Minsk: Vysheysh. shk., 1987. 177 p.
4. Solov'ev V. A. *Dykhatel'nyy gazoobmen drevesiny* [Respiratory gas exchange of wood]. L.: Izd-vo LGU, 1983. 300 s.
5. Ermolin V. N., Eliseev S. G., Namyatov A. V., Mitina E. V. *Sposob lokal'nogo okrashivaniya drevesiny* [Method of local staining of wood] Patent RF, no. 2773657, 2021.

© Акинина Е. В., Дук Д. В., Елисеев С. Г., Ермолин В. Н., 2023

УДК 633.52.854.434:676.017.3.034.24

## ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА РАСТИТЕЛЬНЫХ СУБСТРАТОВ НА ПРОЦЕСС БИОКОНВЕРСИИ ГРИБАМИ РОДА *PLEUROTUS*

М. Е. Арканова\*, Г. З. Ягудина, М. А. Каюкова, А. С. Садаева, Н. Ю. Демиденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: littlestranger@mail.ru

*Рассматривается вопрос утилизации субстратных композиций на основе костры технической конопли и хвойных опилок. В работе предложен метод, позволяющий эффективно утилизировать субстратные композиции.*

*Ключевые слова: техническая конопля, хвойные опилки, утилизация, переработка, биоконверсия.*

## INFLUENCE OF COMPONENT COMPOSITION OF PLANT SUBSTRATES ON THE PROCESS OF BIOCONVERSION BY FUNGI OF THE GENUS *PLEUROTUS*

M. E. Arkanova\*, G. Z. Yagudina, M. A. Kayukova, A. S. Sadaeva, N. Y. Demidenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: littlestranger@mail.ru

*The issue of recycling substrate compositions based on industrial hemp and pine sawdust is being considered. The work proposes a method that allows efficient disposal of substrate compositions.*

*Keywords: industrial hemp, pine sawdust, utilization, processing, bioconversion.*

Леса в Красноярском крае являются источником ценных ресурсов, которые обеспечивают сохранение значительной части мирового запаса углерода, играют роль экологического каркаса для сохранения биоразнообразия экосистем, а также выполняют множество других функций. Только 45-50% от общего объема заготавливаемой биомассы используется в готовых изделиях, остальная её часть является отходами, потребляемыми в качестве топлива, или их просто вывозят и уничтожают, либо складывают.

Накопление древесных отходов крайне опасно для экологии, при хранении таких отходов велика опасность возникновения пожаров, которые будут легко распространяться и создавать новые очаги, поэтому очень важно найти альтернативные методы утилизации и хранения отходов древесного сырья.

Проблема переработки древесных отходов существует давно и до настоящего времени не потеряла своей актуальности. Основными источниками образования отходов являются различные лесопромышленные комплексы и деревоперерабатывающие предприятия.

При этом, необходимо отметить, что помимо древесных отходов накапливаются многотоннажные отходы сельскохозяйственных растений, зачастую также не находящие эффективного применения.

В настоящее время перспективным растительным сырьем является техническая конопля, основными сферами переработки которой являются: пищевая промышленность, строительство, энергетика, ткацкая промышленность и производство целлюлозы. Однако, в качестве сырья в основном используют волокнистую часть или семена, а стебель, или костра по-другому, которая составляет 65-70 % массы лубяного стебля, не перерабатывается, а остается на полях сбора [1].

Поэтому вопрос переработки данных видов сырья является актуальным, а перспективным методом утилизации является биоконверсия.

Известно, что базидиальные грибы обладают оксидоредуктазной и целлюлазной активностью, которые способствуют использованию целлюлозы и других углеводов, а также лигнина, поэтому они являются наиболее перспективными для биоконверсии древесных и растительных материалов, в которых содержание лигноуглеводного комплекса составляет не менее 70 % [2].

В ряду дереворазрушающих базидиомицетов привлекают внимание представители рода *Pleurotus* (вешенки). Представители рода *Pleurotus* являются съедобными, нетоксичными и непатогенными грибами, богатыми легкоусвояемыми белками [3], что позволяет безопасно использовать их как для выращивания в пищевых целях, так и в качестве продуцентов для биоконверсии растительного сырья.

В качестве сырья использовали костру технической конопли и хвойные опилки. Сырье перед сбором в субстратные композиции и проведением биоконверсии механически измельчили. Для биоконверсии лигноуглеводного комплекса были подобраны разные субстратные соотношения. Композиции были взяты в соотношениях 80/20, 60/40, 50/50, 40/60 и 20/80 соответственно.

Перед началом проведения биоконверсии был проведен химический анализ основных компонентов [4]. Так, по результатам анализа было обнаружено, что на долю лигноуглеводного комплекса приходится в среднем от 68,2 % до 81,86%. Это говорит о потенциальной пригодности применения субстратных композиций для процесса биоконверсии.

Биоконверсию проводили твердофазным культивированием, используя в качестве посевного материала агаровые блоки *Pleurotus ostreatus*, вырезанные из краевой зоны роста семисуточной культуры. Агаровые блоки вносили по одной штуке на 5 грамм воздушно сухого сырья, увлажненного до 80 %. Культивирование проводили в течении 12 суток при температуре  $27 \pm 1$  °C [5].

На 12 сутки грибы рода *Pleurotus ostreatus* при визуальном осмотре полностью освоили субстраты.

Следующим этапом работы было проведение химического анализа продуктов биоконверсии. Результаты и сравнения с исходными данными представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Результаты химического анализа после биоконверсии

Показатель	Субстратные композиции (костра технической конопли+хвойные опилки)				
	80/20	60/40	50/50	40/60	20/80
Легкогидролизуемые полисахариды	17,53	17,42	16,47	16,58	16,38
	16,03*	17,04*	15,89*	16,42*	15,67*
Трудногидролизуемые полисахариды	36,76	36,52	34,39	33,34	29,77
	31,76*	31,76*	33,81*	32,74*	28,23*
Негидролизуемый остаток	27,57	25,12	24,71	23,94	22,05
	25,60*	20,30*	22,17*	22,78*	19,54*

\* Значение после биоконверсии с учетом убыли массы.

По полученным экспериментальным данным можно отметить убыль компонентов лигноуглеводного комплекса у субстратных композиций культурой *Pleurotus ostreatus* от 1,92 % до 9,98 %. Наиболее благоприятным для утилизации данных видов сырья является соотношение 60/40 с преобладанием костры технической конопли.

В целом, по результатам проведенных исследований, использование субстратных композиций на основе хвойных опилок и костры технической конопли в качестве субстрата для биоконверсии целесообразно. Использование биоконверсии показало возможность утилизации как древесных так и растительных отходов.

#### Библиографические ссылки

1. Давидян, Г. Г. История коноплеводства в СССР. – Текст : непосредственный // труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – Ленинград, 1970. – Т. 42, Вып. 1. – С. 129-135.

2. Куликова, Н.А., Кляйн, О.И., Степанова, Е.В., Королева О.В. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47. №6. С. 619–634.
3. Заикина, Н. В. Основы биотехнологии высших грибов : учебное пособие для студ. обуч. по напр. Биология / Н. В. Заикина. Москва : Проспект науки, 2007. 336 с. Текст : непосредственный.
4. Рязанова, Т.В. Химия древесины. Часть 2. Основные компоненты древесины: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 240406 Технология химической переработки древесины всех форм обучения и направлению 240100 Химическая технология и биотехнология / Т.В. Рязанова, Н.А. Чупрова, Е.В. Исаева. Красноярск: СибГТУ, 2010.- 228 с.
5. Технология микробиологической переработки растительного сырья культурами *Pleurotus* с получением кормовых продуктов / В. В. Тарнопольская, Т. В. Рязанова, Н. Ю. Демиденко и др. // Химия растительного сырья. 2020. No4. С. 405-411. DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.

### References

1. Davidyan, G. G. Istoriya konoplevodstva v SSSR. – Tekst : neposredstvennyi // trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii. – Leningrad, 1970. – Т. 42, Вып. 1. – S. 129-135.
2. Kulikova, N.A., Klyain, O.I., Stepanova, E.V., Koroleva O.V. Ispol'zovanie bazidial'nykh gribov v tekhnologiyakh pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh otkhodov: fundamental'nye i prikladnye aspekty // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2011. Т. 47. No6. S. 619–634.
3. Zaikina, N. V. Osnovy biotekhnologii vysshikh gribov : uchebnoe posobie dlya stud. obuch. po напр. Biologiya / N. V. Zaikina. Moskva : Prospekt nauki, 2007. 336 s. Tekst : neposredstvennyi.
4. Ryazanova, T.V. Khimiya drevesiny. Chast' 2. Osnovnye komponenty drevesiny: ucheb. posobie dlya studentov, obuvayushchikhsya po spetsial'nosti 240406 Tekhnologiya khimicheskii pererabotki drevesiny vsekh form obucheniya i napravleniyu 240100 Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya / T.V. Ryazanova, N.A. Chuprova, E.V. Isaeva. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010.- 228 s.
5. Tekhnologiya mikrobiologicheskoi pererabotki rastitel'nogo syr'ya kul'turami *Pleurotus* s polucheniem kormovykh produktov / V. V. Tarnopol'skaya, T. V. Ryazanova, N. Yu. Demidenko i dr. // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2020. No4. S. 405-411. DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.

© Арканова М. Е., Ягудина Г. З., Каюкова М. А., Садаева А. С., Демиденко Н. Ю., 2023

УДК 633.52.854.434:676.017.3.034.24

## МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ ГРИБОВ НА РАСТИТЕЛЬНЫХ СУБСТРАТАХ

М. Е. Арканова\*, Г. З. Ягудина, М. А. Каюкова, А. С. Садаева, Н. Ю. Демиденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: littlestranger@mail.ru

*Рассматривается вопрос утилизации субстратных композиций на основе костры технической конопли и хвойных опилок. В работе предложен метод, позволяющий эффективно утилизировать субстратные композиции.*

*Ключевые слова: техническая конопля, хвойные опилки, утилизация, переработка, биоконверсия.*

## MICROBIOLOGICAL PROSPECTS FOR GROWING FUNGI ON PLANT SUBSTRATES

M. E. Arkanova\*, G. Z. Yagudina, M. A. Kayukova, A. S. Sadaeva, N. Y. Demidenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: littlestranger@mail.ru

*The issue of recycling substrate compositions based on industrial hemp and pine sawdust is being considered. The work proposes a method that allows efficient disposal of substrate compositions.*

*Keywords: industrial hemp, pine sawdust, utilization, processing, bioconversion.*

Главным отходом деревообрабатывающих компаний в процессе механической обработки древесной породы являются опилки хвойных пород, общий объем которых порой достигает 20 % от всего обрабатываемого сырья [1]. При этом, технологий действенной переработки опилок недостаточно, поэтому, в основном, они складываются и представляют собой не утилизируемый отход производства, который нередко несет, кроме экологической, ещё и пожарную угрозу. Помимо древесных отходов накапливаются многотоннажные отходы сельскохозяйственных растений, зачастую также не находящие эффективного применения.

Перспективным растительным сырьем является техническая конопля, основными сферами переработки которой являются: пищевая промышленность, строительство, энергетика, ткацкая промышленность и производство целлюлозы. Однако, в качестве сырья в основном используют волокнистую часть или семена, а стебель, или костра по-другому, которая составляет 65-70 % массы лубяного стебля, не перерабатывается, а остается на полях сбора [2].

В настоящее время работа исследователей направлена на решение вопросов, связанных с безопасной и экологичной утилизацией подобных крупнотоннажных отходов. В этой связи, перспективным является применение методов биотехнологии, в частности, процессов биоконверсии, для трансформации растительного сырья с получением ценных, востребованных на рынке продуктов природного происхождения.

Для эффективной биоконверсии необходим отбор и исследование свойств продуцентов, способных ассимилировать основные компоненты предлагаемого субстрата. Известно, что базидиальные грибы обладают оксидоредуктазной и целлюлазной активностью, которые способствуют использованию целлюлозы и других углеводов, а также лигнина, поэтому они являются наиболее перспективными для биоконверсии древесных материалов, в которых содержание лигноуглеводного комплекса составляет не менее 70 % [3,4].

Среди базидиомицетов особое внимание привлекают грибы рода *Pleurotus*; они нетоксичны, непатогенны, богаты белками и другими биологически значимыми веществами, обладают хорошо развитой ферментативной системой и имеют высокую скорость роста в условиях твердофазной ферментации [5].

Цель данной работы заключается в оценке перспектив использования древесных и растительных отходов в процессе биоконверсии культурой *Pleurotus* с получением обогащенных белком кормовых продуктов.

Было проведено много работ по использованию культуры *Pleurotus ostreatus* в качестве продуцента для биоконверсии древесных и растительных отходов. При этом интересным представителем рода *Pleurotus* является культура *Pleurotus columbinus* (вешенка устричная).

По морфологическим признакам *Pleurotus columbinus* и *Pleurotus ostreatus* достаточно схожи, однако, они различны по условиям культивирования. *Pleurotus columbinus* культивируется при более низких температурах, так же этот гриб называют прохладным вариантом обычной вешенки. По литературным данным эта температура составляет +7,22-18,33 °С.

В качестве сырья использовали костру технической конопли и хвойные опилки. Сырье перед сбором в субстратные композиции и проведением биоконверсии механически измельчили. Для биоконверсии лигноуглеводного комплекса были подобраны разные субстратные соотношения. Композиции были взяты в соотношениях 80/20, 60/40, 50/50, 40/60 и 20/80 соответственно.

Перед началом проведения биоконверсии был проведен химический анализ основных компонентов [6]. Так, по результатам анализа было обнаружено, что на долю лигноуглеводного комплекса приходится в среднем от 68,2 % до 81,86 %. Это говорит о потенциальной пригодности применения субстратных композиций для процесса биоконверсии.

Биоконверсию проводили твердофазным культивированием, используя в качестве посевного материала агаровые блоки, вырезанные из краевой зоны роста семисуточной культуры. Агаровые блоки вносили по одной штуке на 5 грамм воздушно сухого сырья, увлажненного до 80 %. Культивирование проводили в течении 12 суток при температуре  $20 \pm 1$  °С.

На 12 сутки грибы рода *Pleurotus columbinus* при визуальном осмотре полностью освоили субстраты.

Следующим этапом работы было проведение химического анализа продуктов биоконверсии.

На долю лигноуглеводного комплекса приходится в среднем от 63,44 до 73,39 %.

По полученным экспериментальным данным можно отметить убыль компонентов лигноуглеводного комплекса у субстратных композиций культурой *Pleurotus columbinus* от 1,92 % до 9,96 %. Наиболее благоприятным для утилизации данных видов сырья является соотношение 60/40 с преобладанием костры технической конопли.

В целом, по результатам проведенных исследований, использование субстратных композиций на основе хвойных опилок и костры технической конопли в качестве субстрата для биоконверсии целесообразно.

Использование биоконверсии показало возможность утилизации как древесных так и растительных отходов. Использование в качестве продуцента культуры *Pleurotus columbinus* позволяет вести процесс биоконверсии с достаточной эффективностью.

### Библиографические ссылки

1. Баяндин, М. А. Влияние механоактивации на аутогезионные свойства древесины / М. А. Баяндин, В. Н. Ермолин, С. Г. Елисеев – Текст : непосредственный // Хвойные бореальной зоны. – 2013. – Т. 31 – № 1-2. – С. 159–163.
2. Давидян, Г. Г. История коноплеводства в СССР. – Текст : непосредственный // труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – Ленинград, 1970. – Т. 42, Вып. 1. – С. 129-135.
3. Куликова, Н.А., Кляйн, О.И., Степанова, Е.В., Королева О.В. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47. №6. С. 619–634.
4. Заикина, Н. В. Основы биотехнологии высших грибов : учебное пособие для студ. обуч. по напр. Биология / Н. В. Заикина. Москва : Проспект науки, 2007. 336 с. Текст : непосредственный.
5. Рязанова, Т.В. Химия древесины. Часть 2. Основные компоненты древесины: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 240406 Технология химической переработки древесины

всех форм обучения и направлению 240100 Химическая технология и биотехнология / Т.В. Рязанова, Н.А. Чупрова, Е.В. Исаева. Красноярск: СибГТУ, 2010.- 228 с.

6. Технология микробиологической переработки растительного сырья культурами *Pleurotus* с получением кормовых продуктов / В. В. Тарнопольская, Т. В. Рязанова, Н. Ю. Демиденко и др. // Химия растительного сырья. 2020. No4. С. 405-411. DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.

### References

1. Bayandin, M. A. Vliyanie mekhanoaktivatsii na autogeziionnye svoistva drevesiny / M. A. Bayandin, V. N. Ermolin, S. G. Eliseev – Tekst : neposredstvennyi // Khvoinye boreal'noi zony. – 2013. – Т. 31 – № 1-2. – S. 159–163.

2. Davidian, G. G. Istoriya konoplevodstva v SSSR. – Tekst : neposredstvennyi // trudy po prikladnoi botanike, genetike i seleksii. – Leningrad, 1970. – Т. 42, Vyp. 1. – S. 129-135.

3. Kulikova, N.A., Klyain, O.I., Stepanova, E.V., Koroleva O.V. Ispol'zovanie bazidial'nykh gribov v tekhnologiyakh pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh otkhodov: fundamental'nye i prikladnye aspekty // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2011. Т. 47. No6. S. 619–634.

4. Zaikina, N. V. Osnovy biotekhnologii vysshikh gribov : uchebnoe posobie dlya stud. obuch. po napr. Biologiya / N. V. Zaikina. Moskva : Prospekt nauki, 2007. 336 s. Tekst : neposredstvennyi.

5. Ryzanova, T.V. Khimiya drevesiny. Chast' 2. Osnovnye komponenty drevesiny: ucheb. posobie dlya studentov, obuvayushchikhsya po spetsial'nosti 240406 Tekhnologiya khimicheskii pererabotki drevesiny vsekh form obucheniya i napravleniyu 240100 Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya / T.V. Ryzanova, N.A. Chuprova, E.V. Isaeva. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010.- 228 s.

6. Tekhnologiya mikrobiologicheskoi pererabotki rastitel'nogo syr'ya kul'turami *Pleurotus* s polucheniem kormovykh produktov / V. V. Tarnopol'skaya, T. V. Ryzanova, N. Yu. Demidenko i dr. // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2020. No4. S. 405-411. DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.

© Арканова М. Е., Ягудина Г. З., Каюкова М. А., Садаева А. С., Демиденко Н. Ю., 2023

УДК 615.322:543.97:547.98

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛАВОНОИДОВ В ЭКСТРАКТАХ ЛИСТЬЕВ ТОПОЛЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Н. С. Баринава\*, Е. В. Исаева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\* E-mail: nata.barinova.55@bk.ru

*В работе установлено наличие флавоноидов в составе суммарного спиртового экстракта и отдельных его фракций из зеленых листьев тополя бальзамического, произрастающего в условиях Красноярского края.*

*Ключевые слова: тополь бальзамический, листья, экстракт, флавоноиды.*

## DETERMINATION OF FLAVONOIDS IN EXTRACTS OF POPLAR LEAVES OF THE KRASNOYARSK REGION

N. S. Barinova\*, E. V. Isaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\* E-mail: nata.barinova.55@bk.ru

*The work established the presence of flavonoids in the total alcohol extract and its individual fractions from the green leaves of balsam poplar growing in the Krasnoyarsk region.*

*Keywords: balsam poplar, leaves, extract, flavonoids.*

В настоящее время большинство исследователей изучают фенольные соединения, среди которых наиболее активно исследуют флавоноиды, обладающие лечебным действием. Данный класс соединений применяют в медицине как желчегонные, гипозотемические, капилляроукрепляющие, гепато-защитные, противоязвенные средства [1]. Благодаря малой токсичности и высокой фармакологической активности флавоноиды являются перспективными источниками для профилактики и лечения ряда серьезных заболеваний [2]. К числу сырьевых источников для получения флавоноидов могут относиться листья растений рода *Populus* [3], в том числе тополя бальзамического, произрастающего в Красноярском крае. Как показали наши исследования, проведенные ранее, в составе почек тополя бальзамического содержатся флавоноиды (пиноцембрин, пинобаксин, хризин, галпангин, пиностроин, 3,4-дигидро-2',6'-дигидрокси-4'-метоксихалкон, 2',6'-дигидрокси-4'-метоксихалкон) и коричневые кислоты. Отличительная особенность флавоноидов почек тополя бальзамического Красноярского края – это меньшее содержание пиностроина и большее халконов по сравнению с тополями других регионов.

Целью настоящей работы является установление наличия флавоноидов в спиртовом экстракте листьев тополя бальзамического, произрастающего в Красноярске.

Объектом исследования служили зеленые листья тополя бальзамического (*Populus balsamifera*). Пробы свежих листьев были отобраны в августе 2022 г. с деревьев, произрастающих на острове Татышев в г. Красноярске. Сырье высушивали до комнатно-сухого состояния. Влажность сырья составила 9,7 %. Экстракцию листьев проводили 96 %-м этиловым спиртом методом настаивания при комнатной температуре в течение трех суток с гидромодулем 20.

Полученные спиртовые экстракты упаривали и подвергали фракционированию с использованием растворителей с возрастающей полярностью: петролейный эфир, диэтиловый эфир, этилацетат и бутанол [4].

С целью определения наличия флавоноидов в суммарном спиртовом экстракте листьев тополя, а также его отдельных фракциях, были использованы качественные реакции, как предварительный фитохимический анализ. С химической точки зрения, флавоноиды представляют собой гидроксипроизводные флавона рис. 1.

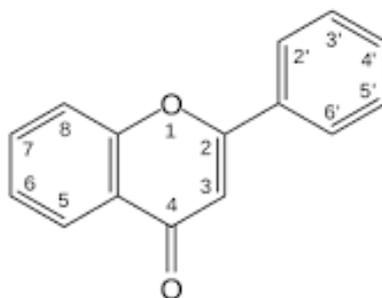


Рис. 1. Структура флавона

**Реакция с едкими щелочами (KOH, NaOH).** К 1-2 мл исследуемого раствора прибавляли 0,5 мл 1-2 %-го раствора гидроксида натрия или калия. Появление оранжевой окраски исследуемого раствора свидетельствует о наличии в составе флавоноидов.

**Реакция с раствором железа (III) хлорида** проводили для обнаружения флавоноидов, имеющих свободные фенольные OH-группы. При добавлении 3 %-го спиртового раствора железа (III) хлорида наблюдается коричневое окрашивание (в случае присутствия OH-группы в положении 3), зеленое окрашивание (присутствует OH-группы в положении 5) или синее окрашивание (присутствуют 3<sup>1</sup>, 4<sup>1</sup>, 5<sup>1</sup>-OH-группы) [5].

**Реакция с раствором алюминия (III) хлорида** была использована для обнаружения флавоноидов. К 1-2 мл исследуемого извлечения добавляли 1-2 мл 3 %-го раствора алюминия (III) хлорида спиртового.

Приготовление 3 %-го спиртового раствора хлорида алюминия: 3 г хлорида алюминия растворяли в 50 мл 70 %-го этилового спирта в мерной колбе вместимостью 100 мл и доводили объем раствора тем же растворителем до метки и перемешивали [6].

При наличии флавоноидов наблюдалась желтая окраска раствора, а желтовато-зеленое свечение при длине волны 366 нм. Следует отметить, что в образовании батохромного комплекса прежде всего принимают участие свободные 3- и 5- OH-группы флавоноидов [5].

Присутствие флавоноидов в составе экстрактов, выделенных методом настаивания из листьев тополя бальзамического, приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты определения флавоноидов в экстрактах листьев тополя**

Экстракт	Название реакции		
	реакция с едкими щелочами	реакция с раствором FeCl <sub>3</sub>	реакция с раствором AlCl <sub>3</sub>
Спиртовой	+	+	+
Петролейный	+	+	+
Диэтиловый	+	+	+
Этилацетатный	+	+	+
Бутанольный	+	+	+

Таким образом, из приведенных результатов следует, что в составе спиртового экстракта листьев тополя бальзамического присутствуют флавоноиды, о чем свидетельствует появление оранжевого окрашивания при реакции с едкой щелочью – гидроксидом калия. В ходе реакции с раствором хлорида железа (III) появлялось зеленое окрашивание, что говорит о том, что флавоноиды имеют свободные фенольные OH-группы в положении 5. А при проведении реакции с раствором хлорида алюминия (III) о наличии флавоноидов свидетельствовала появившаяся желтая окраска испытуемых растворов.

Количество флавоноидов в исследуемых образцах листьев в пересчете на рутин составляет в суммарном спиртовом экстракте 1,74 %, в составе петролейного экстракта 0,5 %, диэтилового экстракта 0,52 %, этилацетатного экстракта 0,47 %, бутанольного экстракта 0,3 % от абсолютно сухого сырья.

### Библиографические ссылки

1. Флавоноиды лекарственных растений: прогноз антиоксидантной активности / В. А. Куркин, В. В. Поройков, А. В. Куркина и др. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 517-523.
2. Ботиров Э. Х., Дренин А. А., Макарова А. В. Химическое исследование флавоноидов лекарственных и пищевых растений // Химия растительного сырья. 2006 . № 1. С. 45-48.
3. Куркин В.А., Куприянова Е.А. Сравнительное исследование флавоноидного состава листьев фармакопейных видов рода *Populus* // Химия растительного сырья. 2020. №1. С.117-124
4. Ложкина Г. А, Исаева Е. В, Рязанова Т. В. Исследование спиртового экстракта почек тополя бальзамического // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 83-87.
5. Куркин, В. А. Фармакогнозия – Самара : Офорт, 2007. 1239 с.
6. Мартынов А. Д, Даргаева Т. Д. Разработка методики количественного определения суммы флавоноидов в траве фиалки одноцветковой // Экспериментальные исследования в биологии и медицине : бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2017. Т.2, № 1 (113). С. 79-83.

### References

1. Flavonoids of medicinal plants: forecast of antioxidant activity / V. A. Kurkin, V. V. Poroikov, A. V. Kurkina, etc. // Modern problems of science and education. 2015. No. 2-2. pp. 517-523.
2. Botirov E. Kh., Drenin A. A., Makarova A. V. Chemical study of flavonoids of medicinal and food plants // Chemistry of plant raw materials. 2006. No. 1. P. 45-48.
3. Kurkin V.A., Kupriyanova E.A. Comparative study of flavonoid composition of leaves of pharmacopoeial species of the genus *Populus* // Chemistry of plant raw materials. 2020. No. 1. P.117-124.
4. Lozhkina G.A., Isaeva E.V., Ryazanova T.V. Study of the alcohol extract of balsam poplar buds // Chemistry of Plant Materials. 2009. No. 1. S. 83-87.
5. Kurkin, V. A. Pharmacognosy. Samara: Etching, 2007. 1239 p.
6. Martynov A. D., Dargaeva T. D. Development of a method for quantitative determination of the amount of flavonoids in the herb *Violet uniflorum* // Experimental research in biology and medicine: bulletin of the All-Russian Scientific Center SB RAMS. 2017. T.2, No. 1 (113). pp. 79-83.

© Баринаева Н. С., Исаева Е. В., 2023

УДК 674.817

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛИТ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ ИЗ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ

М. А. Баяндин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: bayandinma@sibsau.ru

*В работе рассмотрены основные теоретические аспекты формирования структуры материалов без использования связующих веществ из механоактивированной древесной массы.*

*Ключевые слова: механоактивация, древесина, фибрилляция, плиты, связующее.*

## ORGANIZATION OF INVESTMENT ACTIVITIES

M. A. Bayandin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: bayandinma@sibsau.ru

*The paper deals with the main theoretical aspects of the formation of the structure of materials without the use of binders from mechanically activated wood pulp.*

*Keywords: mechanoactivation, wood, fibrillation, boards, binder.*

Наиболее распространенным методом получения плит без использования связующих или с минимальным его количеством является горячее прессование древесных волокон во влажном состоянии. Формирование структуры материала обусловлено механическими зацеплениями и физико-химическим взаимодействием между компонентами древесной массы. Основным компонентом такой массы являются волокна, которые представляют собой древесные клетки (трахеиды) или их пучки.

Известно, что при механическом размоле разрушение древесины происходит по срединной пластинке, что предопределяет целостность геометрии клетки, но при этом наблюдается частичное расслоение вторичного слоя (внутренняя фибрилляция) и незначительным разрушением слоя S1 (внешняя фибрилляция), которая проявляется отделением целлюлозных фибрилл на поверхности волокна. Величина межфазной удельной поверхности при этом существенно не увеличивается в сравнении с массивной древесиной. Такой подход не позволяет обеспечить формирование стойких к воздействию воды структур, даже при пьезотермических воздействиях без введения в состав древесной массы связующих и гидрофобизаторов. При этом следует отметить, что надмолекулярные структуры древесинного вещества в основном образуются за счет водородных связей между гидроксильными группами биополимеров.

При разрушении, т.е. при фибриллировании, они разрываются. В результате на вновь образованных межфазных поверхностях будет большое количество активных функциональных групп. Но основное количество гидроксильных групп с потенциалом образования водородных связей имеют малую доступность, введу того, что основное их количество сосредоточено между фибриллами целлюлозы во вторичном слое клеточной стенки [1,2].

Для понимания процессов формирования структуры материалов за счет аутогезионного взаимодействия необходимо сказать, что древесные массы представляют собой полидисперсные системы. Как известно, при достаточном сближении межфазных поверхностей дисперсных частиц между ними

возникает взаимодействие [3]. Величина энергии взаимодействия между частицами зависит от разных факторов.

Во-первых от природы сил взаимодействия (силы Ван – дер – Ваальса, водородные связи и др.), что определяется свойствами материала частиц.

Во-вторых, от площади контактирующих межфазных поверхностей, которые зависят от размера и формы частиц. Изменить свойства материала частиц не представляется возможным. Геометрические же параметры частиц изменить, в направлении увеличения площади контакта, вполне возможно. И это является главным направлением увеличения аутогезионных взаимодействий между частицами в дисперсных системах.

Проведенные нами ранее исследования указывают, что механоактивация путем гидродинамической обработки с эффектом кавитации позволяет радикально увеличить удельную поверхность древесной массы (до  $350 \text{ г/м}^2$  – сорбция по воде). Несомненно, продольный размер частиц в данном случае меньше длины трахеид примерно в два раза, но при этом их торцы имеют разомкнутые трещины, которые проходят по всей длине частиц. Это во многом указывает на большую фибрилляцию частиц, во всех слоях клеточной стенки. В результате удельная межфазная поверхность может быть существенно увеличена и соответственно доступность функциональных групп без значительного изменения фракционного состава.

Гидрадинамически активированной древесной массе может придаваться требуемая форма и производится сушка конвективным либо кондуктивным способом. При удалении воды между функциональными группами образуются межмолекулярные связи (в основном водородные) между соседними частицами. За счет этого происходит структурообразование материала без использования связующих веществ.

Рассмотрим более подробно условия образования структуры при удалении воды. Активированная древесная масса представляет собой двухфазное капиллярно пористое тело, состоящее только из древесных частиц и воды... Вода занимает все пространство между частицами, образуя сообщающуюся систему капилляров переменного сечения, заполненных водой. На поверхности материала образуется межфазная поверхность вода – воздух виде вогнутого мениска. Согласно закону Лапласа все мениски воды на границе с воздухом по всей поверхности сформированного тела имеют одинаковую кривизну. Наличие менисков предопределяет то, что вода по всему объему тела испытывает растягивающие напряжения, которые сжимают тело, образуя единую связанную структуру, т. н. лапласовский или жидкофазный домен [3]. Древесные частицы каркаса связаны между собой растягивающими напряжениями, возникающими в воде вследствие искривления межфазной поверхности на границе с воздухом. Эти силы имеют механическую природу и малую энергию взаимодействия.

Вода, которая содержится в капиллярах материала, в соответствии с принятой в древесиноведении классификацией, можно подразделить на свободную и связанную. Свободная вода находится в капиллярах, радиус которых более 1,3 нм, связанная (адсорбционная) в капиллярах  $\geq 1,3$  нм. Связи с этим процесс сушки материала можно подразделить на два этапа: 1 этап – удаление свободной воды, 2 этап – удаление связанной воды.

Удаление свободной воды приводит к уменьшению радиуса капилляров. В результате этого возникает усилие, перпендикулярное стенкам капилляра, направленное на их сближение. Возникновение таких усилий в капилляре обусловлено поверхностным натяжением и при малых радиусах оно может достигать сотен МПа. Сумма сил поверхностного натяжения на менисках жидкости в порах структуры по всему поперечному сечению образца принято называть сила капиллярной контракции [4]. В процессе высыхания, под действием сил капиллярной контракции происходит сближение древесных частиц. Внешним проявлением этого является объемная усадка.

Процесс удаления свободной воды очень важен, т.к. на этой стадии создаются условия для получения в конечном итоге материала с высокими свойствами. Для этого необходимо чтобы процесс сближения частиц, а точнее межфазных поверхностей, происходил равномерно по всему объему без возникновения напряжений, связанных с возникновением препятствий для взаимного сближения частиц. Это в конечном итоге обеспечит максимальную площадь межфазных контактов и соответственно прочность материала.

#### Библиографические ссылки

1. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции). М. : Лесная промышленность, 1988. 512 с.

2. Роль поверхности волокон в развитии бумагообразующих свойств технической целлюлозы в процессе размола / Лебедев И. В., Казаков Я. В., Чухчин Д. Г. и др. // Химия растительного сырья. 2018. №. 2. С. 207-216.

3. Чураев Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. – М. : Химия, 1990. – 272 с.

4. Влияние сил капиллярной контракции на механические свойства и структуру высыхающих тел / Остриков М.С, Дибров Г. Д., Ростовцева И. В. и др. // Коллоидный журнал. 1960, Т.22. С. 443-450.

### References

1. Fengel D., Vegener G. *Drevesina (Khimiya, ul'trastruktura, reaktsii)* [Wood (chemistry, ultrastructure, reactions)]. Moscow, Forest industry, 1988. 512 p.

2. Lebedev I. V., Kazakov Ya. V., Chukhchin D. G. [The role of fibre surface in the development of papermaking properties of technical pulp during in the refining process] *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2018, No. 2, p. 207–216. DOI : 10.14258.jcprm.2018022248 (In Russ.).

3. Churaev N. V. *Fizikokhimiya protsessov massoperenosa v poristyykh telakh* [Physicochemistry of mass transfer processes in porous substances]. Moscow, Chemistry, 1990. 272 p.

4. Ostrikov M.S, Dibrov G. D., Rostovtseva I. V. [Influence of capillary contraction forces on mechanical properties and structure of drying bodies] *Kolloidnyy zhurnal*. 1960, No. 2, p. 443–450. (In Russ.).

© Баяндин М. А., 2023

УДК 674.816.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ДЕРЕВОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

С. В. Буглаев<sup>1</sup>, Н. А. Федосеев<sup>2</sup>, В. Д. Эскин<sup>3</sup>, А. И. Криворотова<sup>4</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: stepa-byglaev@mail.ru

*В работе представлены результаты исследований прочностных свойств древесно-цементных композитов на примере арболита, изготовленных из отходов фанерных и древесностружечных производств.*

*Ключевые слова: композиционный материал, древесное сырье, вяжущее, арболит.*

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF MINERAL COMPOSITES BASED ON WOOD PROCESSING WASTE

S. V. Buglaev<sup>1</sup>, N. A. Fedoseev<sup>2</sup>, V. D. Eskin<sup>3</sup>, A. I. Krivorotova<sup>4</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: stepa-byglaev@mail.ru

*The paper presents the results of studies of the strength properties of wood-cement composites on the example of arbolite made from waste plywood and chipboard industries.*

*Keywords: composite material, wood raw materials, binder, arbolite.*

Проблема комплексного использования древесных материалов всегда была актуальна для лесопромышленного комплекса России. Под термином «комплексное использование» понимается, прежде всего, максимальный или стремящийся к максимальному полезный выход при использовании древесных ресурсов. Лишь в редких случаях полезный выход продукции предприятия достигает 65-70 %. К определяющим факторам проблемы следует отнести: некомпетентный состав ИТР, некачественное, морально устаревшее или вышедшее из строя оборудование, неправильно подготовленное к обработке сырье. Все вышеописанное требует поиска решения сложившейся проблемы, разработки новых методов обработки материала, повышения квалификации сотрудников, разработки нетрадиционных технологий использования отходов предприятия.

Данная работа посвящена исследованию свойств древесного композита на минеральном вяжущем на примере арболита в зависимости от вида и состава частиц, изготовленных из древесных отходов деревоперерабатывающих производств.

С целью исследования возможности изготовления древесно-цементного композита были подготовлены древесные отходы нескольких видов. На действующем фанерном предприятии (ООО «Красфан») отобраны отходы шпона-рванины, отходы от форматной обрезки готовой фанеры общего назначения. Древесностружечная плита была нарезана на отрезки соответствующих размеров, ориентируясь на размеры реек от форматной обрезки действующих производств. В качестве вяжущего использовался портландцемент марки М400. Изготовление образцов осуществлялось с помощью деревянной разборной формы, установленной на виброплощадке. Лицевой и оборотный слой материала образовывался с помощью цементно-песчаного раствора. Затем по длине плиты укладывался слой из подготовленных реек с интервалом между рейками менее ширины самих реек. Каждый следующий слой реек располагался под углом  $90^{\circ}$  к полосам предыдущего слоя. Каждый слой реек укрывался

цементным раствором. Изготовленный материал выдерживался в соответствии с заданными режимами [1].

На рис. 1 и рис. 2 представлена зависимость прочностных свойств, изготовленного древесно-цементного композита от породы древесины, используемой для изготовления фанеры, от которой были отобраны отходы форматной обрезки, отходы древесностружечных плит и стандартной древесной дробленки: 1, 2 – отходы фанерного производства (соответственно береза и сосна); 3 – отходы древесностружечного производства; 4 – древесная дробленка.

Как видно из приведенных зависимостей, прочность арболита, изготовленного на основе отходов форматной обрезки фанеры несколько меньше прочности при сжатии арболита на основе древесной дробленки. При этом значения прочности на сжатие остаются в пределах требований стандарта для арболита марки В 2,0. Прочность при изгибе образцов на основе отходов форматной обрезки превышает прочность образцов на основе отходов производств древесностружечных плит и на основе стандартной древесной дробленки. Также следует отметить, что образец на основе реек из форматной обрезки березовой фанеры имеет более высокую прочность. Это связано с более высокой прочностью на изгиб березовой фанерной продукции, у которой древесный шпон в процессе изготовления фанеры укладывается с взаимно перпендикулярным направлением волокон [2–5].



Рис. 1 – Зависимость прочности при сжатии от вида древесного заполнителя

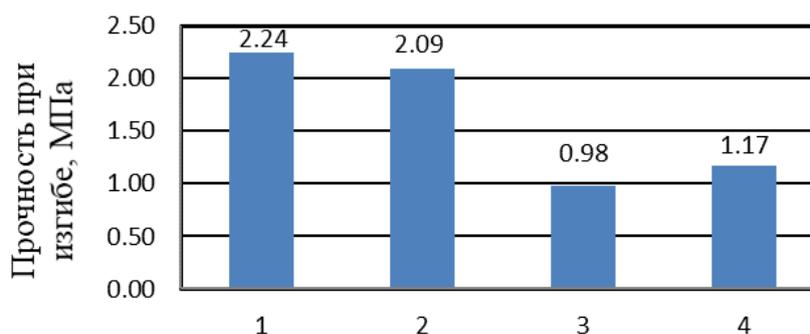


Рис. 2 – Зависимость прочности при изгибе от вида древесного заполнителя

Таким образом, использование кусковых отходов фанерного и древесностружечного производства (обрезков от форматной обработки, шпона–рванины) при изготовлении арболита является перспективным и позволяет изготовить древесно-цементный композит с высокими физико-механическими свойствами.

#### Библиографические ссылки

1 СТО 7.5.02-2019. Стандарт организации. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов образовательной деятельности. – Красноярск :СибГУ, 2019 г. – Текст : непосредственный.

2 Криворотова, А.И. Технология композиционных материалов и изделий : методические указания / А.И. Криворотова, Б.Д. Руденко, Ю.М. Довбыш. – 2-е изд. – Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2013. – 56 с. – Текст : непосредственный.

3 Грушевская, Е.Н. Композиционные материалы на основе минеральных вяжущих, модифицированных добавками вторичных полимеров/ Е. Н. Грушевская, Г. Я. Мусафирова, С. В. Максимович // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров. В 3 ч. Ч. 2 : сб. науч. ст. XIX междунар. научн.-метод. семинара, Брест, 23-25 окт. 2014 г. – Брест : БрГТУ, 2014. – С. 39-43.

4 Использование твердых промышленных отходов в производстве материалов строительного назначения / И. Н. Липунов, А. А. Юпатов, В. И. Аликин. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2009. – № 1. – С. 19– 23. – Рез.англ. – Библиогр.: с. 22–23 (17 назв.).

5 Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов / Т. О. Степанова, А. А. Гайнуллина. – Текст : непосредственный // Актуальные направления научных исследований XXI века. Теория и практика. – 2014. – № 2. – С. 299– 303. – Рез.англ. – Библиогр.: с. 302–303 (5 назв.).

### References

1STO 7.5.02-2019.Standartorganizatsii.Sistema menedzhmentakachestva.Obshchietrebovaniya k postroeniyu, izlozheniyuioformleniyudokumentovobrazovatel'noideyatel'nosti. – Krasnoyarsk :SibGU, 2019 g. – Tekst : neposredstvennyi.

2 Krivorotova, A.I. Tekhnologiyakompozitsionnykhmaterialoviizdelii :metodicheskieukazaniya / A.I. Krivorotova, B.D. Rudenko, Yu.M. Dovbysh. – 2-eizd. – Krasnoyarsk :SibGUim. M.F. Reshetneva, 2013. – 56 s. – Tekst :neposredstvennyi.

3 Grushevskaya, E.N. Kompozitsionnyematerialynaosnovemineral'nykhvyazhushchikh, modifitsirovannykhdobavkamivtorichnykhpolimerov/ E. N. Grushevskaya, G. Ya.Musafirova, S. V. Maksimovich // Perspektivnyenapravleniyainnovatsionnogorazvitiyastroitel'stvaipodgotovkiinzhenernykhkadrov. V 3 ch. Ch. 2 : sb. науч. st.KhIKhmezhdunar. nauchn.-metod. seminar, Brest, 23-25 okt. 2014 g. – Brest :BrGTU, 2014. – S. 39-43.

4Ispol'zovaniyetverdykhpromyshlennykhotkhodov v proizvodstvematerialovstroitel'nogonaznacheniya / I. N. Lipunov, A. A. Yupatov, V. I. Alikin. – Tekst :neposredstvennyi // Ekologiyaipromyshlennost' Rossii. – 2009. – № 1. – S. 19– 23. – Rez. angl. – Bibliogr.: s. 22–23 (17 nazv.).

5Sovremennyyestroitel'nyekompozitsionnyematerialynaosnovedrevesnykhotkhodov / T. O. Stepanova, A. A. Gainullina. – Tekst :neposredstvennyi // Aktual'nyenapravleniyanauchnykhissledovaniixXIveka. Teoriyaiapraktika. – 2014. – № 2. – S. 299– 303. – Rez. angl. – Bibliogr.: s. 302–303 (5 nazv.).

© Буглаев С. В., Федосеев Н. А., Эскин В. Д., Криворотова А. И., 2023

УДК66.015.23

## ТАРЕЛКА ДИАБАТИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ\*

Н. А. Войнов, А. В. Богаткова, Д. А. Земцов, В. А. Чернов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: n.a.voynov@mail.ru

*Разработана новая тарелка для проведения диабатической ректификации состоящая из насадки перекрестного тока и пакета профилированных горизонтально установленных пластин. Представлены результаты исследования гидродинамики и массообмена. Показано преимущество колонны с новой тарелкой в сравнении с насадочной противоточного типа.*

*Ключевые слова: насадка, диабатическая ректификация, эффективность, гидравлическое сопротивление, тарелка.*

## TRAY OF THE DIABATIC RECTIFICATION COLUMN

N. A. Voinov\*, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov, V. A. Chernov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: n.a.voynov@mail.ru

*A new tray for diabatic rectification is developed consisting of a cross-current packing and a package of horizontally profiled trays. The results of hydrodynamics and mass transfer research are presented. The advantage of the column with the new tray in comparison with the counterflow packing is shown.*

*Keywords: packing, diabatic rectification, efficiency, pressure drop, tray.*

Ректификация широко применяется для разделения многокомпонентных сред в химической, нефтехимической и лесной промышленности. Среды зачастую термолабильны, для их разделения используют вакуумные колонны. В промышленности в основном применяют насадочные противоточные колонны. Для интенсификации процесса разделения представляют интерес установки насадочного типа перекрестного тока [1]. В сравнении с насадочными противоточными колоннами они обладают меньшим сопротивлением, однако уступают им в эффективности. Для увеличения эффективности таких устройств авторами разработана комбинированная тарелка перекрестного тока, работающая в условиях диабатической ректификации [2].

Схема разработанной тарелки показана на рис. 1а. При работе колонны с представленной тарелкой основной поток флегмы стекает через отверстия 3 на насадку контактируя с поднимающимися парами разделяемой смеси. Другая часть флегмы образованная при частичной конденсации паров на поверхности дефлегматора 6 размещенного над каждой тарелкой колонны стекает на поверхность профилированных медных пластин, где осуществляется частичное ее испарение, что приводит к укреплению поднимающих по колонне паров [3]. Таким образом, насадка обеспечивает исчерпывание легколетучего компонента за счет тепломассообмена, а горизонтально установленные пластины укрепление паров за счет испарения с поверхности пластин и парциальной конденсации на оголенной поверхности пластин. Целью работы является выбор эффективной насадки для тарелки и исследование ее эффективности.

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).

В качестве насадки на тарелке исследовались спирально-призматическая (рис. 1б), регулярная из просечного листа (рис. 1в), кольца Рашига (рис. 1г), спираль диаметром 3 мм выполненная из нержавеющей стали.

Диаметр корпуса тарелки составил 195 мм. Толщина слоя насадки изменялась от 18 до 40 мм, высота насадки составила 45 и 90 мм. Спирально-призматическая насадка размером 3,0×4,0 мм выполнялась из нихромовой проволоки диаметром 0,18 мм [4]. Регулярная насадка выполнена из алюминиевого просечного листа толщиной 1,5 мм с размером ячейки 3×6 мм. Насадка Рашига изготавливалась из пластмассовой трубки диаметром 6 мм. Компоновка профилированных пластин на тарелке, рис. 1а. осуществлялась согласно патента [5].

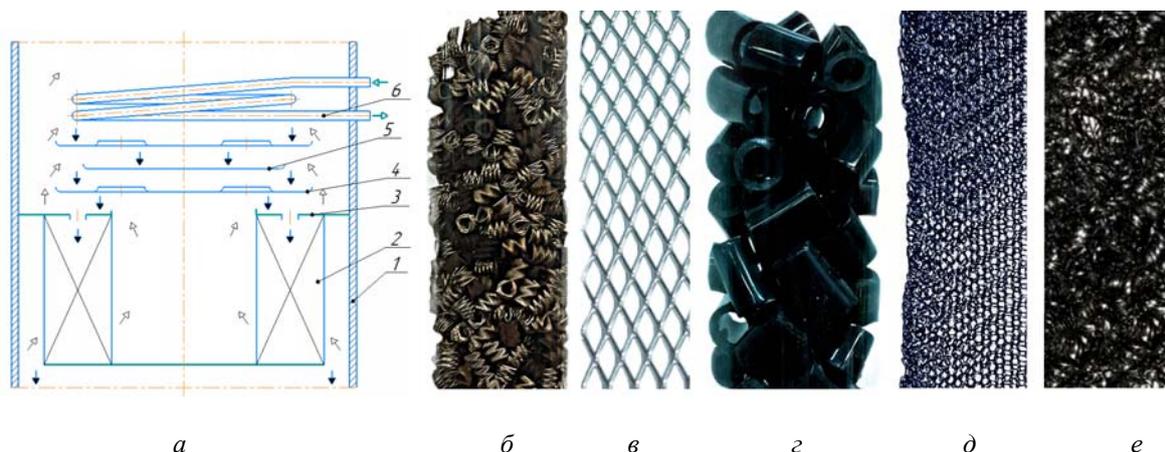


Рис. 1. Схема насадочной тарелки перекрестного тока (а), спирально- призматической насадка (б), регулярная насадка (в), кольца Рашига (г) насадка Панченкова (д), спираль из нержавеющей стали (е):

1 – корпус, 2 –насадка, 3 – отверстия для ввода жидкости 4 – профилированные пластины, 5 – отбортованные отверстия для прохода пара, 6 – дефлегматор тарелки; I – поток флегмы; II – пар  
 —▷— вода; —▶— рабочая смесь; —▷— пар

Эффективность тарелки исследованная на примере абсорбции кислорода водой представлена на рис. 2а и ректификации на смеси этанол-вода на рис. 2б.

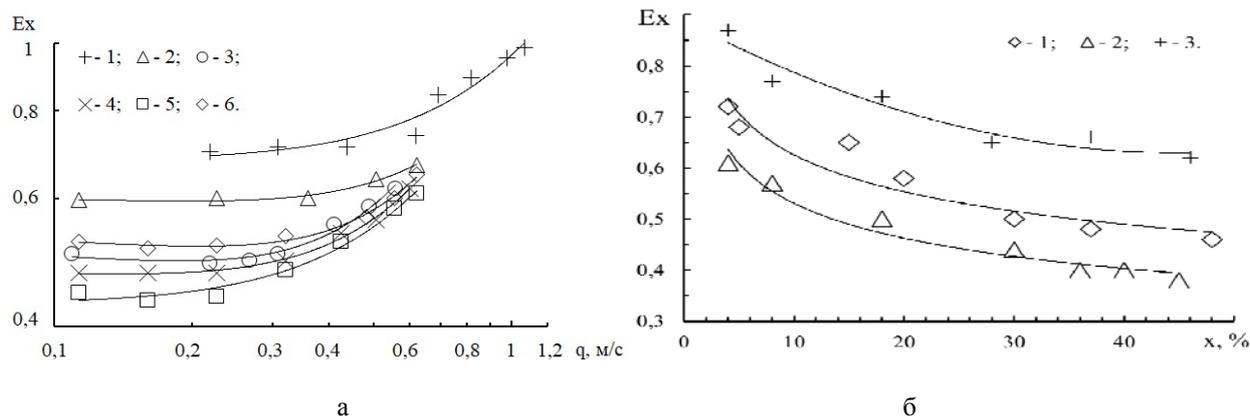


Рис. 2. Эффективность тарелки от удельного расхода пара (газа) при абсорбции (а) и ректификации (б) при флегмовом числе 1,5-3 и тепловой нагрузке 12-14 кВт:

а) Экспериментальные данные для расхода жидкости  $L=(0,8-1,2) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  при высоте насадки  $h=90-100 \text{ мм}$  (1-6): спирально-призматическая насадка (1-2): 1 – ширина насадки  $b=40 \text{ мм}$ ; 2 –  $b=18 \text{ мм}$ ; 3 – регулярная насадка  $b=25 \text{ мм}$ ; 4 – кольца Рашига  $b=40 \text{ мм}$ ; 5 – насадка Панченкова  $b=18 \text{ мм}$ ; 6 – насадка из металлической спирали  $b=25 \text{ мм}$ ; б) тарелка со спирально-призматической насадкой,  $b=25 \text{ мм}$  и удельном расходе газа  $q=0,2-0,5 \text{ м}^3/\text{с}$  (1-2): 1 –  $h=100 \text{ мм}$ ; 2 –  $h=45 \text{ мм}$ ; 3 – тарелка состоящая из спирально-призматической насадки  $h = 100 \text{ мм}$  и пяти профилированных пластин, согласно рис. 1а.

Согласно данным наибольшая эффективность в области слабых взаимодействий достигается на тарелке со спирально призматической насадкой. Размещение над тарелкой пластин позволило повысить эффективности до 0,65-0,9, рис. 3б.

Гидравлическое сопротивление тарелки перекрестного тока в исследуемом диапазоне расхода газа 10-60 м<sup>3</sup>/час составило для всех типов насадки 30-300 Па. Это существенно ниже чем в насадочной противоточной тарелке. Согласно полученным данным с увеличением высоты слоя насадки и скорости газа, а также расхода орошаемой жидкости гидравлическое сопротивление тарелки возрастает. Наблюдается два режима взаимодействия фаз на тарелке область слабого взаимодействия и эмульгированный.

Преимуществом разработанной тарелки по сравнению с насадочной противоточной является снижение гидравлического сопротивления в 1,5 раза и уменьшение массы насадки в 4,4 раза.

### Библиографические ссылки

1. Марешова Л.А., Богатых К.Ф., Рольник Л.З., Ягафарова Г.Г. Результаты внедрения в промышленность разработок по регулярным перекрестноточным насадкам. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2007. №1. С. 74
2. Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Voinov N.A., Alashkevich Y.D. Enhanced mass transfer in thermal fractionation. Chemical and petroleum engineering. 2018. Vol. 53. № 9-10. P. 568-571.
3. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Deryagina N.V., Bogatkova A.V., Zhukova O.P. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop. Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 185. Pp. 1-13.
4. Войнов А.Н., Жукова О.П., Паньков В.А., Войнов Н.А. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой. Техника и технология пищевых производств. 2012. №4 (27). С. 95-99.
5. Пат. № 2755176 РФ, МПК В01Д 3/26. Контактная ступень колонны термической ректификации / Войнов Н. А., Земцов Д. А., Жукова О. П., Дерягина Н. В.

### References

1. Mareshova L.A., Bogatykh K.F., Rol'nik L.Z., Yagafarova G.G. Rezul'taty vnedreniya v promyshlennost' razrabotok po regulyarnym perekrestnotochnym nasadkam. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo. 2007. №1. S. 74
2. Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Voinov N.A., Alashkevich Y.D. Enhanced mass transfer in thermal fractionation. Chemical and petroleum engineering. 2018. Vol. 53. № 9-10. P. 568-571.
3. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Deryagina N.V., Bogatkova A.V., Zhukova O.P. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop. Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 185. Pp. 1-13.
4. Voynov A.N., Zhukova O.P., Pan'kov V.A., Voynov N.A. Rektifikatsiya etilovogo spirita v kolonnakh so spiral'no-prizmaticheskoy nasadkoy. Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2012. №4 (27). S. 95-99.
5. Pat. № 2755176 RF, MPK B01D 3/26. Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikatsii / Voynov N. A., Zemtsov D. A., Zhukova O. P., Deryagina N. V.

© Войнов Н. А., Богаткова А. В., Земцов Д. А., Чернов В. А., 2023

УДК 66.015

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК

Р. С. Голушко, Ю. А. Амбросович, Д. А. Земцов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mr.golushko2017@mail.ru

*Представлены различные виды гидравлических и пневматических форсунок. Описан принцип работы каждой из них. Выделены их основные достоинства и недостатки. Сделаны заключения об области их применения.*

*Ключевые слова: гидравлические форсунки, пневматические форсунки, принцип работы.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF HYDRAULIC AND PNEUMATIC NOZZLES

R. S. Golushko, Y. A. Ambrosovich, D. A. Zemtsov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mr.golushko2017@mail.ru

*Various types of hydraulic and pneumatic injectors are presented. The principle of operation of each of them is described. Their main advantages and disadvantages are highlighted. Conclusions are made about the scope of their application.*

*Keywords: hydraulic injectors, pneumatic injectors, the principle of operation.*

Основными задачами химической промышленности является увеличение объема производства химических продуктов, глубины переработки, повышению качества выпускаемых продуктов, расширение их ассортимента и повышение качества. В связи с этим представляется интерес изучения и сравнения гидравлических и пневматических форсунок.

По принципу работы гидравлические форсунки можно разделить на шесть основных классов: струйные, центробежные, центробежно-струйные, ударно-струйные, с соударением струй и комбинированные.

Струйные форсунки, рис. 1а, представляют собой насадку с цилиндрическим соплом, из которого вытекает струя жидкости, распадающаяся на капли относительно крупного размера и образующая факел с малым корневым углом и значительной дальностью струи.

В центробежных форсунках, рис. 1б, создается закрутка подаваемой через нее жидкости. В сопловом канале, вдоль его стенки, жидкость движется в виде вращающейся пленки, а центр заполняет так называемый воздушный вихрь. При истечении из сопла жидкостная пленка распадается, образуя факел в виде полого конуса.

Центробежно-струйные форсунки, рис. 1в, отличаются от центробежных наличием двух потоков подводимой жидкости [1].

Ударно-струйные форсунки (рис. 1з). В этих форсунках распыливание происходит вне корпуса насадки, за счет удара струи об отражатель, расположенный напротив соплового отверстия.

Форсунки с соударением струй (рис. 1д). Работа этих форсунок основана на взаимном разбивании струи на отдельные капли за пределами корпуса форсунки. Из точки столкновения двух струй жидкость растекается радиально, образуя пленку, распадающуюся на капли.

Таким образом, если гидравлическое распыливание позволяет обеспечить требуемые характеристики, то во всех случаях, когда необходимо достаточно тонкое распыливание, а равномерность не играет существенной роли, следует применять центробежные форсунки; для жидкостей с повышен-

ной вязкостью или содержащих механические примеси можно рекомендовать ударно-струйные форсунки; если необходимо равномерное или иное распределение жидкости в факеле, которое нельзя обеспечить другими распылителями, следует использовать центробежно-струйные форсунки [2 – 3].

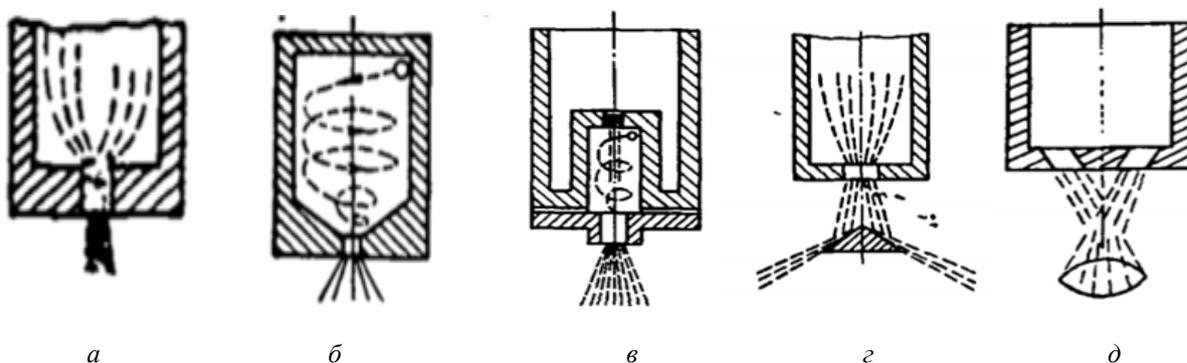


Рис. 1 Схема струйной форсунки (а), центробежной (б), центробежно – струйной (в), ударно-струйной форсунки(г) и с соударением струй (д)

К достоинствам пневматического способа относятся малая, по сравнению с гидравлическим, зависимость качества распыливания от расхода жидкости, надежность в эксплуатации, возможность распыливания высоковязких жидкостей [4 – 5].

Недостатки: повышенный расход энергии на распыливание (50-60 кВт на 1 т жидкости), необходимость в распыливающем агенте и в связанном с ним оборудовании.

В пневматических форсунках процесс распыления обусловлен взаимодействием распыливаемой жидкости с распыливающим газом, а также образовавшейся смеси с окружающей средой.

В форсунках внешнего смешения рис. 2а взаимодействие потоков и собственно процесс распыливания происходят за пределами форсунки, в непосредственной близости от сопла, под действием разности скоростей распыливаемой жидкости, распыливающего газа и окружающей среды.

В форсунках внутреннего смешения рис. 2б потоки взаимодействуют перед истечением из форсунки, обычно в концевом объеме внешнего газового (воздушного) сопла, длина которого несколько больше, чем внутреннего жидкостного.

Из сопла вытекает газожидкостная смесь, и образовавшиеся при внутреннем смешении первичные крупные капли в результате взаимодействия с окружающей средой распадаются на более мелкие.

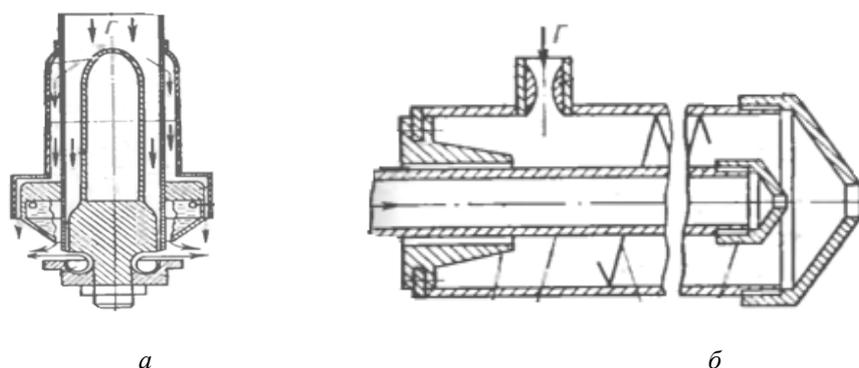


Рис. 2 Схема форсунки внутреннего (а) и внешнего смешения (б)

Пневматическое распыливание целесообразно применять тогда, когда требуется тонкое диспергирование значительного количества жидкости или жидкостей с повышенной вязкостью, либо когда технологический процесс предусматривает ввод в аппарат больших количеств газа или газа под высоким давлением.

Было показано, что в гидравлических форсунках возможно самые различные виды распределения жидкости в факеле, однако управлять этой характеристикой можно только в центробежно-струйных.

В пневматических форсунках факел можно рассматривать как газовую струю с дисперсной примесью капель.

### Библиографические ссылки

1. Пажи Д. Г., Прахов А. М., Равикович Б. Б., форсунки в химической промышленности. – Издательство Химия, Москва; 1971. – 224 с.
2. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Распылители жидкостей. – Москва: Химия, 1979. – 216 с., ил.
3. Садовин, Е. В., Емельянычева Е. А. Распределительные устройства реакторов гидропроцессов // Вестник технологического университета. Казанский национальный исследовательский технологический университет. Казань. – 2017. С. 58 – 60.
4. Современные насадочных колонны: особенности конструктивного оформления / Леонтьев В.С., Сидоров С.И. // Химическая промышленность. 2005, № 7. С. 347-356.
5. Ахметов С. А. и др. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: Учебное пособие / С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов; Под ред. С.А. Ахметова. – СПб: Недра, 2006. – 868 с; ил

### References

1. Page D. G., Prahov A. M. Ravikovich B. B., forsunks in chemical promulgationstranslaces. – Chemistry Publishing House, Moscow; 1971. – 224 pp.
2. Page D. G., Galustov V. S. Spreadsheets gidkostey. – Moscow. Chemistry, 1979. – 216 PP., II.
3. Sadovin, It Is. V. It's Emelyan. A. Spreadsheet devices reactor hydroprocessors // Journal of the University of technology. Kazan National University of technology. Kazan. – 2017. S. 58 – 60.
4. Modern packing columns: design features / Leontiev B.C., Sidorov S.And. // Chemical promulgation-planeness. 2005, № 7. S. 347-356.
5. Akhmetov S. A. etc. Technology and equipmentprocess processing oil and pelvis: educational tool / С.А. Akhmetov, Т.Р. Serikov, I.R. Kuzeyev, M.And. Bajazitov; under order. S.A. Akhmetova. – SPB: Nedra, 2006. – 868 С; II

© Голушко Р. С., Амбросович Ю. А., Земцов Д. А., 2023

УДК 663.479.1:631.576.33

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОРЛУПЫ КЕДРОВОГО ОРЕХА В ПРОИЗВОДСТВЕ КВАСА БРОЖЕНИЯ

\*Д. В. Иванников<sup>1</sup>, С. А. Потапенко<sup>2</sup>, О. Н. Ерёмченко<sup>3</sup>, Ж. А. Кох<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>4</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, Проспект Мира, 90

\*E-mail: ivannikoffden@yandex.ru

*В работе предложена рецептура кваса с частичной заменой концентрата квасного суслу на экстракт скорлупы кедрового ореха, что позволило получить оригинальный напиток повышенной биологической ценностью.*

*Ключевые слова: квас, функциональный напиток, кедровый квас, скорлупа кедрового ореха, брожение.*

## PROSPECTS FOR THE USE OF PINE NUT SHELLS IN THE PRODUCTION OF FERMENTED KVASS

D. V. Ivannikov\*, S. A. Potapenko, O. N. Eremenko, J. A. Koch

<sup>1-3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>4</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Prospect Mira, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: ivannikoffden@yandex.ru

*The paper proposes a recipe for kvass with partial replacement of kvass wort concentrate with pine nut shell extract, which made it possible to obtain an original drink with increased biological value.*

*Keywords: kvass, functional drink, cedar kvass, pine nut shell, fermentation.*

Частые стрессовые ситуации и потребление вредных продуктов привели к ухудшению состояния здоровья населения. На сегодняшний день люди стали все больше заниматься спортом и обращать внимание на состав и полезность продуктов. Это привело к увеличению спроса на продукты функционального значения. Отмечается, что часто встречаемой в рационе человека и удобной группой продуктов для обогащения являются напитки [1]. В последнее время высоким спросом пользуется квас. Это традиционный русский напиток, который не только утоляет жажду, но и имеет сбалансированный химический состав. Однако, просматривается отчетливая тенденция к разработке и расширению ассортимента квасов брожения с использованием растительного сырья, богатого биологически активными веществами, обладающими антиоксидантными и иммуностимулирующими свойствами.

С нашей точки зрения одним из таких перспективных видов сырья можно рассматривать скорлупу кедрового ореха (СКО). В настоящее время с использованием вкусоароматических свойств настоек и экстрактов кедрового ореха выпускаются алкогольные и безалкогольные бальзамы, водки, ликеры, джины. Однако стоит отметить, несмотря на то, что основным компонентом в составе кедрового ореха, который определяет дегустационные характеристики получаемых напитков, является скорлупа (до 60 % от массы ореха), случаи производства напитков на ее основе единичны. Следовательно, разработка новых направлений использования СКО с возможностью исключения из технологического процесса синтетических биологически активных и вкусоароматических добавок приобретает особую актуальность. Анализ химического состава показал, что скорлупа кедрового ореха представляет уникальный источник углеводно-минерального комплекса и различных органических веществ. СКО бо-

гата кальцием, насыщена дубильными веществами, в ее составе присутствуют 16 аминокислот, из которых преобладает глутаминовая. Она участвует в синтезе белков, повышающих выносливость и поддерживающих физическую форму людей. Среди витаминов можно отметить витамин С [2]. Аскорбиновая кислота повышает иммунитет и укрепляет стенки сосудов. Таниды обладают вяжущими, противовоспалительными и ранозаживляющими свойствами. Они способны образовывать на поврежденной слизистой оболочке защитную пленку, под которой происходит активная регенерация ткани за счет образования слоя новых, молодых клеток [1]. Таким образом, СКО отвечает требованиям, предъявляемым к функциональным ингредиентам.

При разработке рецептур квасов «Кедровый» за основу была взята классическая рецептура кваса брожения «Хлебный» [3]. Учитывая при разработке новых рецептур напитков принцип совместимости (обогащающие добавки не должны ухудшать органолептические и физико-химические показатели обогащенных продуктов, по сравнению с традиционными аналогами), было предложено заменить концентрат квасного сусла на 30 и 50 % экстрактом скорлупы кедрового ореха. В полученных образцах определяли физико-химические (таблица 1) и органолептические показатели.

Таблица 1

**Физико-химические показатели напитков брожения**

Показатели	Содержание		
	квас «Кедровый» (30 %)	квас «Кедровый» (50 %)	квас «Хлеб- ный»
Массовая доля сухих веществ, %	6,6	8,1	6,20
Объемная доля этилового спирта, %	0,8	1,0	0,60
Кислотность, к.ед. / 100 мл	2,3	2,3	2,80
Цветность, см <sup>3</sup> раствора йода концентрацией 0,1 моль/дм <sup>3</sup> на 100 см <sup>3</sup> напитка	2,34	2,68	2,80
Витамин В <sub>1</sub> , мг/100 см <sup>3</sup>	0,9	1,1	0,02
Витамин В <sub>2</sub> , мг/100 см <sup>3</sup>	1,3	1,7	0,04
Витамин В <sub>6</sub> , мг/100 см <sup>3</sup>	2,61	2,87	-
Витамин С, мг/100 см <sup>3</sup>	0,3	0,73	-
Витамин РР, мг/100 см <sup>3</sup>	3,3	3,69	0,56
Относительная стандартная ошибка опыта не превышает 5 %			

По физико-химическим показателям разработанные кедровые напитки не только соответствуют требованиям, предъявляемым к квасам брожения, выгодно отличаются от классического хлебного кваса высоким содержанием витаминов. Результаты проведения органолептической оценки показали, что оба образца кваса «Кедровый» обладали сладковатым и освежающим вкусом с легкими нотками кедра. Результаты дегустационной оценки (рисунок 1), показали, что респонденты высоко оценили не только органолептические показатели кедровых квасов, но и их способность утолять жажду.

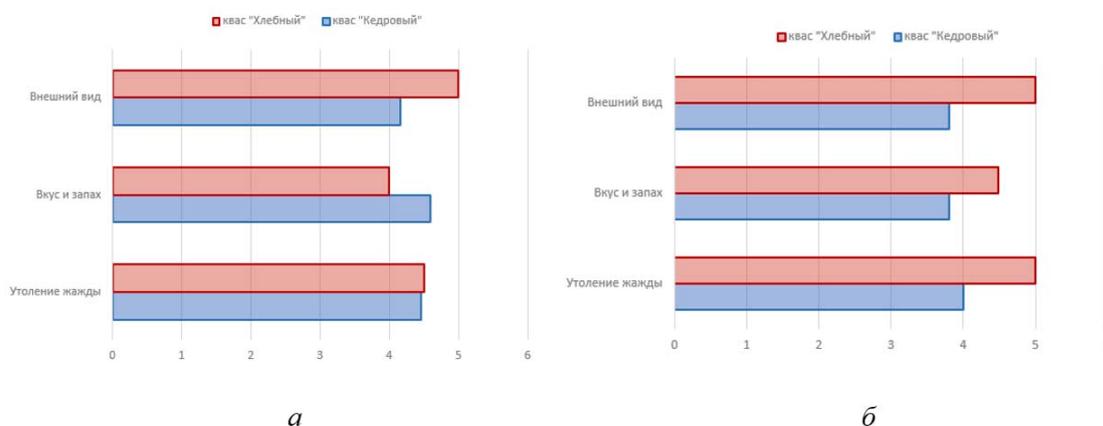


Рис. 1. Результаты дегустационной оценки  
а-б: а – 15-17 лет; б – 20-25 лет

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований доказали перспективность использования скорлупы кедрового ореха для производства кваса брожения с повышенной биологической ценностью и оригинальными вкусом и ароматом.

### Библиографические ссылки

1. Сетко Н. П. Биологически активные добавки и пищевые добавки в питании современного человека: учебное пособие / Н. П. Сетко, Е. Б. Бейлина, Е. А. Володина, Т. А. Фатеева, [и др.]; под ред. Н. П. Сетко; Оренбургский государственный медицинский университет. – Оренбург: ОрГМА, 2013. – 344 с.
2. Хантургаев А.Г. Производство функциональных продуктов из семян сосны сибирской: научные основы и практическая реализация: монография. / А. Г. Хантургаева, В. Г. Ширеторова, Т. И. Котова, В. А. Хантургаева; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. – 140 с.
3. Иванников, Д. В. Напитки брожения на основе растительного сырья Сибири / Д. В. Иванников, И. К. Фанагина // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск: под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. – С. 273-275.

### References

1. Setko N. P. Biologically active additives and food additives in the nutrition of modern man: a textbook / N. P. Setko, E. B. Beilina, E. A. Volodina, T. A. Fateeva, [et al.]; edited by N. P. Setko; Orenburg State Medical University. – Orenburg: OrGMA, 2013. – 344 p.
2. Khanturgaev A.G. Production of functional products from Siberian pine seeds: scientific foundations and practical implementation: monograph. / A. G. Khanturgaeva, V. G. Shiretorova, T. I. Kotova, V. A. Khanturgaeva; East Siberian State University of Technology and Management. – Ulan-Ude: Publishing House of VSGUT, 2018. – 140 p.
3. Ivannikov, D. V. Fermentation drinks based on plant raw materials of Siberia / D. V. Ivannikov, I. K. Fanagina // Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. – Krasnoyarsk: under the general editorship of Yu. Yu. Loginov ; SibGU named after M. F. Reshetnev, 2021. – pp. 273-275.

© Иванников Д. В., Потапенко С. А., Еременко О. Н., Кох Ж. А., 2023

УДК 663.914.21:606

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОФЕЙНОГО ЖМЫХА И СКОРЛУПЫ КЕДРОВОГО ОРЕХА В ПРОЦЕССАХ БИОКОНВЕРСИИ

Д. В. Иванников\*, С. А. Потапенко, О. Н. Еременко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: ivannikoffden@yandex.ru

*Показана возможность утилизации скорлупы кедрового ореха и кофейного жмыха с использованием культуры микроорганизмов рода *Trichoderma* sp.*

*Ключевые слова: твердофазное культивирование, скорлупа кедрового ореха, кофейный жмых; биопрепараты.*

## THE POSSIBILITY OF USING COFFEE CAKE AND PINE NUT SHELLS IN BIOCONVERSION PROCESSES

D. V. Ivannikov\*, S. A. Potapenko, O. N. Eremenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ivannikoffden@yandex.ru

*The possibility of utilization of pine nut shells and coffee cake using a culture of microorganisms of the genus *Trichoderma* sp is shown.*

*Keywords: solid-phase cultivation, pine nut shell, coffee cake; biological products.*

На данный момент остро стоит вопрос создания таких производств, которые являлись бы малоотходными или, в целом, безотходными, с целью сокращения и устранения вредного влияния на окружающую среду. Отходами производства кваса брожения на основе нетрадиционных видов сырья являются скорлупа кедрового ореха (СКО) и кофейный жмых [1]. Актуальным и перспективным направлением по утилизации отходов растительного происхождения является получение биопрепаратов для защиты растений от фитопатогенных грибов с использованием грибов рода *Trichoderma* и *Fusarium*. Преимуществами данного направления являются: наличие дешевого и доступного возобновляемого сырья, биоразрушение лигноуглеводного комплекса с получением биофунгицидов, способных ограничивать рост и развитие фитопатогенных грибов и, при этом, улучшить качество почв [2].

Большинство видов *Trichoderma* являются сапротрофами, следовательно, в природных условиях они потребляют многие полимерные субстраты, среди которых преобладают целлюлоза и гемицеллюлоза [3]. Все целлюлазы имеют одинаковую химическую специфичность к 1,4-гликозидным связям, но по механизму действия классифицируются на экзо- и эндогликанызы. Экзогликанызы имеет высокую активность к кристаллической целлюлозе, механизм действия заключается в отщеплении целлюбиозы с конца полисахаридной цепи. Эндогликанызы активно действуют на аморфные участки целлюлозы и способны гидролизовать замещенную целлюлозу [3].

С целью подтверждения возможности использования СКО и кофейного жмыха в качестве субстрата на первом этапе был определен химический состав. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Как видно, оба вида растительных отходов представлены лигноуглеводным комплексом, на долю которого приходится от 60 до 89 %, что свидетельствует о потенциальной пригодности их в качестве субстрата для культивирования.

Таблица 1

## Содержание компонентов скорлупы кедрового ореха и кофейного жмыха

Наименование показателя	Содержание, %	
	скорлупа кедрового ореха	кофейный жмых
Влажность	6,80	6,22
Минеральные вещества	0,47	5,37
ТГП	32,41	26,41
ЛГП	20,43	20,84
Лигнин	36,00	12,82
Белки	2,90	13,90
Жиры	0,99	14,44
Относительная стандартная ошибка опыта не превышает 5 %		

Следующим этапом работы было проведено твердофазное культивирование грибов рода *Trichoderma sp.* при температуре (27±2) °С в течение 12 суток. Подсчет титра спор осуществляли на 3-е, 7-е и 12-е сутки. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2

## Зависимость спорообразования от продолжительности культивирования

Субстрат	Титр, кое/г		
	3-е сутки	7-е сутки	12-е сутки
Кофейный жмых	38·10 <sup>6</sup>	56,5·10 <sup>6</sup>	85·10 <sup>6</sup>
Кедровый шрот	19·10 <sup>6</sup>	31,1·10 <sup>6</sup>	46,9·10 <sup>6</sup>
Кедровый шрот+кофейный жмых	42·10 <sup>6</sup>	51,5·10 <sup>6</sup>	76,8·10 <sup>6</sup>

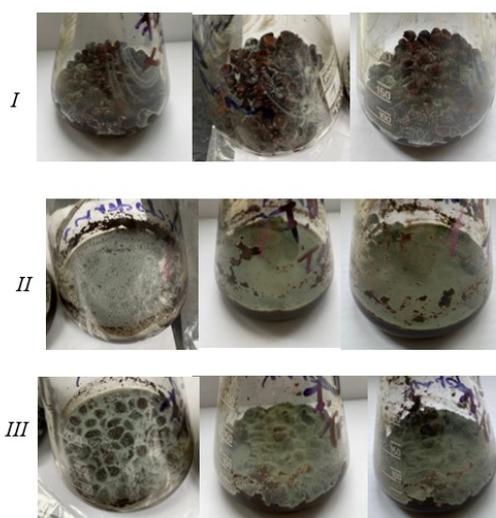


Рис. 1. Динамика роста *Trichoderma sp.* на скорлупе кедрового ореха и кофейном жмыхе  
I-III: I – кедровый шрот; II – кофейный жмых;  
III – кедровый шрот+кофейный жмых

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод: на всех субстратах виден рост микроорганизмов, а наибольшая активность наблюдается на кофейном жмыхе и титр спор составляет 85·10<sup>6</sup> кое/г, что практически в два раза превышает титр спор на СКО.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о потенциальной пригодности рассматриваемых видов растительных отходов в качестве субстратов для биоконверсии и требуют более детального изучения условий культивирования грибов рода *Trichoderma* с возможностью получения биопрепаратов.

#### Библиографические ссылки

1. Использование кедрового ореха для получения функциональных напитков брожения / Д. В. Иванников, С. А. Потапенко, В. В. Шалин, О. Н. Еременко. // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск: под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. – С. 233-235.
2. Проблемы применения растительных отходов для получения биологических препаратов защиты / Ю. А. Литовка, А. Г. Савицкая, Т. В. Рязанова, Н. А. Нешумаева. // Химия растительного сырья. – 2011. – № 3. – С. 167-172.
3. Алимова Ф. К. Промышленное применение грибов рода *Trichoderma* / Ф. К. Алимова. – Казань : Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина, 2006. – С. 209.

#### References

1. The use of pine nuts for obtaining functional fermentation beverages / D. V. Ivannikov, S. A. Potapenko, V. V. Shalin, O. N. Eremenko. // Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. – Krasnoyarsk: under the general editorship of Yu. Yu. Loginov; SibSU named after M. F. Reshetnev, 2022. – pp. 233-235.
2. Problems of using plant waste for obtaining biological protection preparations / Yu. A. Litovka, A. G. Savitskaya, T. V. Ryazanova, N. A. Neshumaeva. // Chemistry of vegetable raw materials. – 2011. – No. 3. – pp. 167-172.
3. Alimova F. K. Industrial application of fungi of the genus *Trichoderma* / F. K. Alimova. – Kazan : Kazan State University named after V. I. Ulyanov-Lenin, 2006. – p. 209.

© Иванников Д. В., Потапенко С. А., Еременко О. Н., 2023

УДК 678.8:658.567

## МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПОЗИТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

З. А. Иванов, Б. А. Байдунов, А. Е. Васюк, О. А. Есякова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: zaharivanov53345@gmail.com

*В статье рассмотрены существующие методы переработки композитных упаковочных материалов, потерявших потребительские свойства, их преимущества и недостатки. Приведена сравнительная характеристика существующих технологий утилизации упаковки Tetra-Pak и Doy-Pak и установлены наиболее перспективные и эффективные направления.*

*Ключевые слова: переработка, композитные материалы, кислоты, расслоение, механическая, термическая, химическая обработка.*

## METHODS OF PROCESSING COMPOSITE PACKAGING MATERIALS

Z. A. Ivanov, B. A. Baidurov, A. E. Vasyuk, O. A. Esiakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: zaharivanov53345@gmail.com

*The article discusses the existing methods of processing composite packaging materials that have lost their consumer properties, their advantages and disadvantages. A comparative characteristic of the existing Tetra-Pak and Doy-Pak packaging recycling technologies is given and the most promising and effective directions are identified.*

*Keywords: processing, composite materials, acids, stratification, mechanical, thermal, chemical treatment.*

Утилизация твердых коммунальных отходов (ТКО), образующихся в процессе жизнедеятельности человека, является важным вопросом для современного сообщества. К сожалению, далеко не для всех видов отходов существуют на данный момент эффективные и широко применяемые способы переработки, вследствие чего все эти отходы размещаются на полигонах ТКО.

Согласно оценке текущего состояния экологической безопасности в России, приведенной в Стратегии [1], ежегодно образуется около 4 млрд. тонн отходов производства и потребления. Из них 50-60 млн. тонн составляют твердые коммунальные отходы (ТКО).

Загрязнение, вызываемое многочисленными объектами размещения отходов, влияет не только на близлежащую к ним территорию, но и на объекты окружающей среды: почву, атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, что свидетельствует о необходимости разработки и внедрения технологий переработки отходов с дальнейшим переводом их из категории отходов в продукцию, пригодную для дальнейшего вторичного использования, так называемый рециклинг.

При рассмотрении морфологии твердых коммунальных отходов можно обнаружить достаточно большой процент содержания композитных упаковочных материалов, составляющих примерно 12 % от общей массы, поступающих на полигоны отходов. Этот вид отходов и является предметом исследования данной работы.

Слоистые алюминиевые материалы, или композитные материалы, нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, космическая, энергетическая и другие. Наиболее широкое использование композитные материалы нашли в пищевой промышленности в качестве упаковки для продуктов питания.

Свое распространение композитные материалы получили благодаря уникальным свойствам, таким как легкость, прочность и коррозионная стойкость. К тому же, в условиях текущего развития технологий, производство слоистых материалов является экономически целесообразным, что, в свою очередь, делает данный вид упаковочных материалов привлекательным для производителей товаров народного потребления.

Однако, такая упаковка представляет собой сложную структуру, состоящую из нескольких слоев: 75 % картона, 20 % полиэтилена, 5 % алюминия. Картон служит каркасом для пищевой упаковки. Внешний слой полиэтилена, в свою очередь, защищает картон от влаги, а внутренний слой склеивает между собой картон с алюминием. Алюминиевый слой не пропускает свет и кислород, что способствует сохранению свежести продукта внутри упаковки, тем самым обеспечивая ее асептические свойства. Для того, чтобы алюминий не взаимодействовал с пищевым продуктом, его также покрывают полиэтиленовым слоем. Все это придает пищевой упаковке долговечность, надежность в использовании и защищает упакованные в нее продукты от внешних факторов [2].

Компания Enval рассчитывает ввести в эксплуатацию первую коммерческую установку для вторичной переработки этого материала. Эта технология позволяет разделить упаковочный материал на отдельные компоненты и получать чистый алюминий для его внедрения в цепочку поставок вторичного алюминия и углеводороды, которые могут быть использованы в качестве топлива или химического сырья. Технологический процесс, разработанный компанией Enval, основан на пиролизе, вызванного волнами СВЧ. Особенностью данного процесса является тот факт, что в отличие от альтернативных технологий, пиролиз осуществляется при более низкой температуре (400 °С вместо почти 800 °С) в камере без кислорода [3].

Гродненский государственный университет предложил новый подход к решению вопроса переработки слоистых алюминиевых материалов. Для многослойной упаковки типа Tetra-Pak разработан сухой метод переработки путем воздействия на ее фрагменты силами трения. После такого механического воздействия происходит отделение целлюлозы от поли-алюминиевой смеси, затем разделение ее при помощи воздушной струи на алюминий и полиэтилен.

Одним из нововведений в данной технологии является применение аппарата – диспергатора, так называемое устройство, измельчающее материалы и смешивающее их до однородной массы. При перемешивании диспергатором, всегда образуется стойкая гомогенизированная смесь. Полная схема процесса описана на рисунке 1.

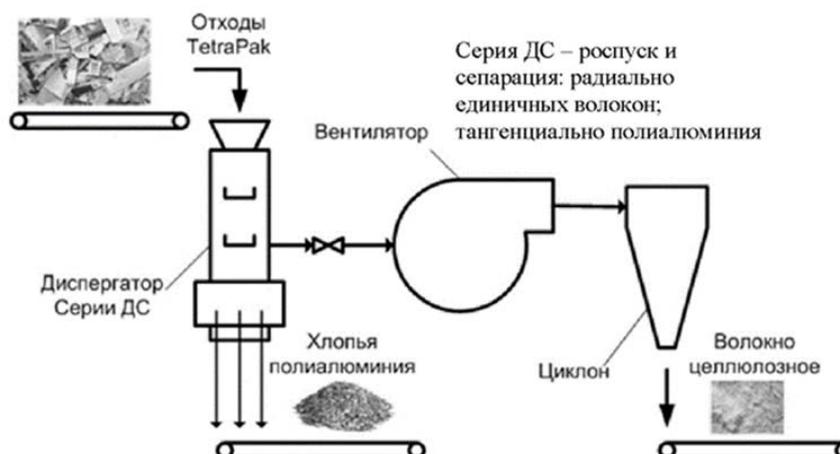


Рисунок 1. Схема переработки упаковки Tetra-Pak

Сущность данного метода заключается в том, что при интенсивном перемешивании в диспергаторе, многослойная упаковка постепенно разделяется на слои под действием сильного внешнего механического воздействия.

Частицы алюминия с нанесённым на него полиэтиленом осаждаются в первом диспергаторе данной цепочки переработки. Основным недостатком данного этапа является нераздельность таких слоёв, как алюминий и полиэтилен. Поскольку алюминий выделяется не чистой фракцией, то его дальнейшее применение встает под большим сомнением.

Оставшаяся масса, переходящая в следующий диспергатор под действием вентилятора, измельчается. Полученную смесь так же нельзя назвать чистой фракцией из-за присутствия окрашенного картонного слоя и наличия полиэтилена, не отделившегося от картонного слоя. Полученную массу предлагается в дальнейшем гранулировать для подготовки к вторичному использованию [4].

Основные преимущества данного метода заключаются в энергосбережении и относительной экономичности процесса. Однако, полного разделения слоёв композитных упаковочных материалов не происходит, что не решает проблему о дальнейшем использовании получаемых продуктов.

В 2022 году авторами данной публикации была предложена схема переработки слоистых алюминиевых материалов.

Технология включает в себя стадии дробления отходов, аэросепарации (разделение на органические и неорганические компоненты в воздушном потоке), сушки и гранулирования шихты, карбонизации и тушения углерода, утилизации тепла, двухступенчатой очистки дымовых газов, конденсирования мазутной фракции. И позволяет выделять в чистом виде наиболее широкие морфологические фракции, поступающих на переработку отходов с последующей реализацией компонентов в качестве товарного продукта.

Предлагаемый метод переработки слоистых алюминиевых материалов заключается в последовательной механической, химической и термической обработке.

Установлено, что оптимальным является измельчение упаковки до размеров 5x5 мм, так как расслоение начинается по периметру образца, меньшая площадь способствует увеличению интенсивности расслоения.

В качестве химического реагента использовалась азотная кислота различной концентрации: от 20 до 60 % с шагом 10 %. При протекании каждой реакции поддерживалась фиксированная температура: 30, 40, 50, 60 °С. Ниже 30 °С условия не применялись в связи с увеличением продолжительности времени протекания реакции. Выше 60 °С температуру не применялась по причине больших потерь кислоты в виде испарений. Для получения репрезентативных данных проводили серию экспериментов в соответствии с матрицей эксперимента.

Эксперимент проводился следующим образом: кислота заданной концентрации заливалась в термостойкий сосуд и разогревалась до заданной температуры. По достижению фиксированной температуры исследуемые образцы помещались в сосуд. Процесс расслоения происходил при интенсивном перемешивании, что способствовало ускорению разделения слоёв. Окончание расслоения фиксировалось визуально.

В результате химико-термических процессов получались полностью разделенные слои упаковочного материала, готовые к последующей переработке, к примеру, грануляции, и вторичному использованию в качестве сырья для производства новой товарной продукции.

Использованная в процессе разделения отходов многослойной упаковки азотная кислота образует во время процесса дополнительный вторичный продукт в виде нитрата алюминия, который может в дальнейшем применяться в текстильной промышленности в качестве протравы при дублении кож или в качестве катализатора при очистке стоков от нефтепродуктов и т.д.

Основываясь на обзоре существующих альтернативных способов переработки, можно прийти к выводу, что вопрос о переработке слоистых алюминиевых материалов остается актуальным, поскольку нет окончательно принятой технологии, который бы отвечал всем требованиям и был бы максимально эффективен без побочных эффектов.

Рекомендуется применение нового подхода к вопросу о переработке композитных материалов, а именно комбинированный метод, который бы включал механическую, термическую и химическую обработку, что повысило бы эффективность до максимально возможной.

### Библиографические ссылки

1. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденная Указом Президента РФ.2017. 15 с.
2. Патент № 2681642 С2 Российская Федерация, МПК В32В 23/06, В32В 27/10, В32В 5/18. Упаковочный материал и упаковочный контейнер: № 2016151373: заявл. 28.05.2015: опубл. 11.03.2019 / Ньюман У., Альден М., Тофт Н.; заявитель Тетра Лаваль холдингз энд файнэнс С.А. – 32 с.: ил. – Текст: непосредственный.
3. Upakovano.ru: сайт. – Москва. – URL: <http://www.upakovano.ru/articles/365616> (дата обращения: 25.05.23.). – Текст: электронный.

4. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: традиционные материалы / И. Ю. Ухарцева, Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде, В. М. Шаповалов // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2021. – Т. 11, № 2. – С. 60-71. – Текст: непосредственный.

5. Иванов, З. А. Разработка технологии переработки слоистых алюминиевых материалов / З. А. Иванов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с Международным участием), Красноярск, 21–22 апреля 2022 года. – Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2022. – С. 391-393. – Текст: непосредственный.

### References

1. The Strategy of Environmental Safety of the Russian Federation for the period up to 2025, approved by Decree of the President of the Russian Federation. 2017. 15 p.

2. Patent No. 2681642 C2 Russian Federation, MPK V32V 23/06, V32V 27/10, V32V 5/18. Packaging material and packaging container: No. 2016151373: application 28.05.2015: publ. 11.03.2019 / Nyuman U., Alden M., Toft N.; applicant Tetra Laval holdings and Finance S.A. – 32 p.: ill. – Text: direct.

3. Upakovano.ru: website. – Moscow. – URL: <http://www.upakovano.ru/articles/365616> (date of reference: 05/25.23.). – Text: electronic.

4. Utilization of packaging materials as the basis of environmental safety: traditional materials / I. Yu. Ukhartseva, E. A. Tsvetkova, V. A. Goldade, V. M. Shapovalov // Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 6. Technique. – 2021. – Vol. 11, No. 2. – P. 60-71. – Text: direct.

5. Ivanov, Z. A. Development of technology for processing laminated aluminum materials / Z. A. Ivanov // Young scientists in solving urgent problems of science: a collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists (with International participation), Krasnoyarsk, April 21-22, 2022. – Krasnoyarsk: SibGU named after Academician M.F. Reshetnev, 2022. – P. 391-393. – Text: direct.

© Иванов З. А., Байдунов Б. А., Васюк А. Е., Есякова О. А., 2023

УДК 663.18

## КОНВЕРСИЯ КОРЫ ХВОЙНЫХ ГРИБАМИ *PLEUROTUS PULMONARIUS*

Е. В. Исаева\*, А. И. Харченко, О. О. Мамаева, Л. М. Сербина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\* E-mail: isaevaelena08@mail.ru

*В статье представлены результаты культивирования базидиального гриба *Pleurotus pulmonarius* на коре хвойных – отходе деревопереработки – с целью получения кормового продукта.*

*Ключевые слова: биоконверсия, кора хвойных, утилизация отходов, *Pleurotus pulmonarius*.*

## CONVERSION OF CONIFEROUS BARK BY *PLEUROTUS*

E. V. Isaeva\*, A. I. Kharchenko, O. O. Mamaeva, L. M. Serbina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\* E-mail: isaevaelena08@mail.ru

*The article presents the results of the cultivation of the basidiomycete *Pleurotus pulmonarius* on various wood processing wastes.*

*Key words: bioconversion, conifer bark, recycling, *Pleurotus pulmonarius*.*

Россия – одна из ведущих стран по объему заготавливаемой древесины. Только в Восточной Сибири ежегодно вырубается около 16 млн м<sup>3</sup> спелой древесины (преимущественно сосны), которая применяется в лесоперерабатывающей, целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности или экспортируется [1]. При существующих способах переработки древесного сырья в целом по России используется около половины, а в сибирском регионе – лишь третья часть биомассы дерева. Объем отходов в стране чрезвычайно велик. Основные потери приходятся на древесную зелень (лесосечные отходы), кору (отходы деревопереработки), опилки и стружки (отходы лесопиления). Необходимость утилизации отходов лесоперерабатывающей промышленности – одна из важнейших экологических проблем.

Также в настоящее время актуальной проблемой для всего мира является дефицит белка. Белки растительного происхождения при всех их достоинствах, имеют ряд серьезных недостатков (отсутствие отдельных незаменимых аминокислот, наличие ингибиторов синтеза ферментов), что требует дополнительных методов обработки и производственных затрат. Производство белков животного происхождения является дорогостоящим и трудоемким. Культивирование базидиальных грибов, таких как вешенка, на лигноцеллюлозном сырье, позволит решить обе эти проблемы, поскольку аминокислотный состав гриба не уступает белкам животного и растительного происхождения, а по некоторым показателям даже превосходит [2].

Целью настоящего исследования является определение химического состава компонентов субстрата из отходов окорки до и после биоконверсии грибами *Pleurotus pulmonarius*.

Объектом настоящего исследования являлись отходы окорки деревообрабатывающего комбината (г. Торжок): смесь коры хвойных пород, кора после молотковой дробилки и кора после кавитации в среде моноэтаноламина. В качестве биологического агента использовалась культура гриба РР-3.2. Гриб традиционно используется в качестве продуцента для получения кормовых продуктов, имеет мощную ферментативную систему (целлюлазы и оксидазы), которая способна расщеплять целлюлозу и лигнин; является съедобным, нетоксичным и непатогенным грибом, богатым перевариваемым протеином [3, 4].

Для утилизации отходов деревоперерабатывающей промышленности и получения белковых кормовых продуктов проводили твердофазное культивирование гриба рода *Pleurotus pulmonarius* (штамм РР-3.2). Субстраты засеивали чистой культурой в чашках Петри в стерильных условиях и осуществляли инкубирование при постоянной температуре ( $25 \pm 1$ ) °С до полного обрастания субстрата мицелием [4]. Для исследования компонентного состава коры до и после биодеструкции использовали методы, применяемые в химии древесины [5].

Как показали результаты исследования, на всех используемых субстратах продуцент образовывал колонии белого цвета с характерным грибным запахом. С наибольшей скоростью гриб рос на коре после кавитации (6,3 мм/сут), с наименьшей на исходной коре. Предварительная обработка приводит к изменению в составе компонентов коры, в большей степени при использовании гидроударного диспергатора, где процесс размола совмещается с экстракцией, приводящей к снижению содержания экстрактивных веществ; в данном случае по сравнению с исходной корой их общее содержание снизилось в два раза (табл. 1).

Таблица 1

Компонентный состав субстратов до и после биоконверсии

Компонент	Содержание, % абсолютно сухого сырья					
	исходная кора		кора после молотковой дробилки		кора после кавитации	
	до	после	до	после	до	после
Водоэкстрактивные вещества	6,2±0,3	5,7±0,3	5,8±0,3	5,1±0,2	3,1±0,1	2,9±0,2
Спиртоэкстрактивные вещества	8,2±0,4	6,4±0,3	7,9±0,4	6,0±0,3	4,9±0,2	3,0±0,2
Легкогидролизуемые полисахариды	11,5±0,5	9,4±0,5	11,0±0,5	9,0±0,4	10,3±0,5	8,7±0,4
Трудногидролизуемые полисахариды	28,1±1,3	18,3±0,9	27,1±1,3	17,2±0,9	27,1±1,3	19,9±0,9
Лигнин	30,4±1,4	24,0±1,2	29,8±1,5	22,7±1,1	28,1±1,4	20,6±1,0
Минеральные вещества	8,2±0,4	6,0±0,3	8,2±0,4	6,6±0,3	6,4±0,4	4,1±0,2

Тем не менее, в коре после разных видов обработки также наблюдается довольно высокое содержание всех компонентов, что является важным фактором для культивирования грибов белой гнили.

При анализе постферментированных субстратов установлено, что все компоненты подвергаются биоконверсии. Убыль массы субстратов составила 6-8 %.

Водорастворимые вещества наиболее интенсивно утилизировались в субстрате после молотковой дробилки, а спирторастворимые – после кавитации. Общее количество экстрактивных веществ в субстратах из исходной коры и коре после молотковой дробилки уменьшилось в 1,2 раза.

Содержание легкогидролизуемых полисахаридов в процессе культивирования вешенки легочной на исходной коре и после молотковой дробилки снизилось на 18,2 %, после кавитации на 15,5 %. Наибольшая их убыль отмечена на коре после молотковой дробилки (36,5 %) и исходной коре (34,8 %), наименьшая – на коре после кавитации – 26,6 %.

Утилизация лигнина наиболее интенсивно происходила в субстрате, состоящем из коры после кавитации; в нем содержание лигнина уменьшилось на 26,5 %, в субстрате на основе коры после молотковой дробилки на 24 %, исходной коры – на 21 % от исходного содержания.

В процессе биодеструкции содержание минеральных компонентов также наиболее интенсивно снижалось в субстрате из коры после кавитации (1,6 раза или 36%). В исходной коре количество минеральных веществ уменьшилось в 1,35 раза (или 28,6 %), после молотковой дробилки – в 1,24 раза (или 19,5 %).

Таким образом, на основании полученных данных о химическом составе субстратов до и после биоконверсии можно сделать вывод о возможности использования коровых отходов деревопереработки для культивирования базидиальных грибов вида *Pleurotus pulmonarius*.

### Библиографические ссылки

1. Степень Р. А., Репях С. М. Альтернативные пути рациональной переработки древесных отходов // Инвестиционный потенциал лесопромышленного комплекса Красноярского края : материалы науч.-практ. конф. Красноярск, 2001. С. 14–19.
2. Бухало, А. С. Высшие съедобные базидиомицеты в поверхностной и глубинной культуре. Киев : Наукова думка, 1983. 144 с.
3. Мельникова Е. А., Еременко О. Н., Рязанова Т. В. Комплексная переработка коры сосны // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / отв. ред. Ю.А. Безруких ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 156-160.
4. Mamaeva, O. O., Isaeva, E. V. Use of post-extraction fir wood greenery residues by the bioconversion method with the production of feed additives // Forests. 2021. Т. 12, № 3. С. 1-11.
5. Рязанова Т. В., Чупрова Н. А., Исаева Е. В. Химия древесины. Монография // Saarbrücken. Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. 428 с.

### References

1. Stepen' R. A., Ropyah S. M. *Al'ternativnye puti racional'noj pererabotki drevesnykh othodov* // Investicionnyj potencial lesopromyshlennogo kompleksa [Alternative ways to rationally process wood waste]. Krasnoyarskogo kraja : materialy nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk, 2001. S. 14–19.
2. Buhalo, A. S. *Vysshie s'edobnye bazidiomicety v poverhnostnoj i glubinnoj kul'ture* [Higher edible basidiomycetes in surface and deep culture]. Kiev : Naukova dumka, 1983. 144 s.
3. Mel'nikova E. A., Eremenko O. N., Ryazanova T. V. *Kompleksnaya pererabotka kory sosny* [Complex processing of pine bark] // *Innovacii v himiko-lesnom komplekse: tendencii i perspektivy razvitiya* : materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. / отв. red. YU.A. Bezrukih ; SibGU im. M.F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2017. S. 156-160.
4. Mamaeva, O. O., Isaeva, E. V. *Use of post-extraction fir wood greenery residues by the bioconversion method with the production of feed additives* // Forests. 2021. Т. 12, № 3. S. 1-11.
5. Ryazanova T. V., Chuprova N. A., Isaeva E. V. *Himiya drevesiny. Monografiya* [Wood chemistry] // Saarbrücken. Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. 428 s.

© Исаева Е. В., Харченко А. И., Мамаева О. О., Сербина Л. М., 2023

УДК 674.817-41

## ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛИТ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ИЗ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ

С. Н. Казицин, О. В. Тримасова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: sergeikaz060890@yandex.ru

*Изучение гигроскопических свойств плитных материалов на основе древесины представляет практический интерес. В данной работе определены гигроскопические свойства плит без связующих веществ средней плотности из механоактивированных древесных частиц, получены изотермы сорбции и десорбции воды методом длительного выдерживания в гигростатах с известной относительной влажностью воздуха.*

*Ключевые слова: древесные плиты, гигроскопичность, водостойкость, сорбция.*

## HYGROSCOPIC PROPERTIES OF MEDIUM DENSITY BINDERLESS BOARDS MADE OF MECHANICALLY ACTIVATED WOOD PARTICLES

S. N. Kazitsin, O. V. Trimasova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sergeikaz060890@yandex.ru

*The study of hygroscopic properties of wood-based board materials is of practical interest. In this work, the hygroscopic properties of medium density binderless boards made of mechanically activated wood particles were determined and the isotherms of water sorption and desorption were obtained by long-term incubation in hygrometers with known relative air humidity.*

*Keywords: wood boards, hygroscopicity, water resistance, sorption.*

В процессе хранения и эксплуатации плитные материалы на основе древесины подвергаются воздействию влажного воздуха и воды. В ходе данного воздействия древесно-плитные материалы изменяют свои свойства, геометрические размеры и формы. Поэтому изучение гигроскопических свойств данных материалов представляет практический интерес.

Для подтверждения ранее проведенных исследований гигроскопических свойств плит без связующих веществ средней плотности [1] были проведены испытания для определения предела гигроскопичности данных плитных материалов методом длительного выдерживания в гигростатах с известной относительной влажностью воздуха в соответствии с ГОСТ 24816 – 2014 [2]. Методика получения плит без связующих веществ средней плотности подробно описана в работах [3,4].

Для экспериментальных исследований были подготовлены две группы образцов массой  $1,32 \pm 0,02$  г. Образцы первой группы в течение 24 ч вымачивали в воде, второй – высушивали в сушильном шкафу при температуре  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  до постоянной массы. На образцах первой группы исследовалась десорбция материала, второй группы – сорбция. Для проведения испытаний были подготовлены гигростаты с относительной влажностью воздуха 7; 10; 14; 20; 30; 45; 60; 70; 80; 85; 90 %. Для создания различной относительной влажности воздуха в гигростатах использовалась серная кислота соответствующих концентраций.

Образцы каждой партии взвешивались и помещались в гидростаты. Через каждые 7 суток определялась масса образцов. Эксперимент продолжался до тех пор, пока два последовательных результата взвешивания не показали одинаковые результаты. Влажность образцов определялась сушильно-

весовым способом. Испытания продолжались 31 сутки. На основании средних значений экспериментальных данных были построены кривые зависимости влажности образцов от относительной влажности воздуха в гидростате, представленные на рисунке 1.

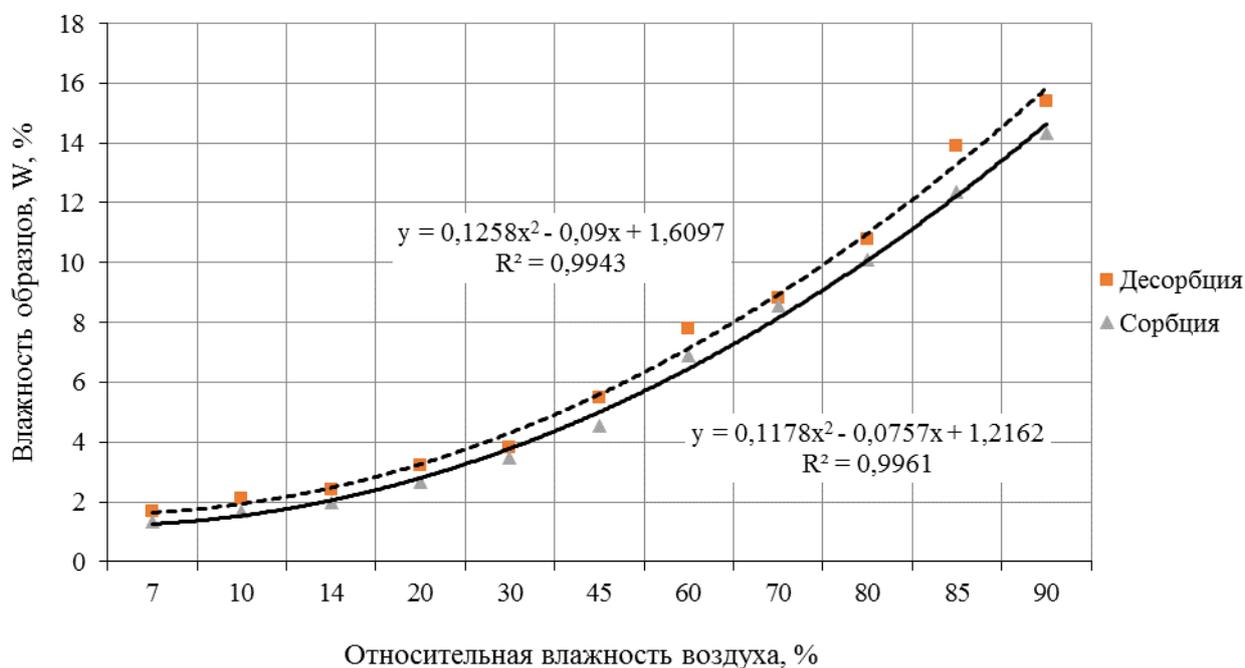


Рис. 1. Изотермы сорбции и десорбции плит без связующих веществ средней плотности из механоактивированных древесных частиц

Равновесная влажность древесных плит ниже, чем древесины, из которой изготовлены данные плиты. Это объясняется тем, что в процессе производства древесные частицы покрываются тонким слоем связующего и их водостойкость повышается под действием температуры в период сушки и прессования плит. Так при относительной влажности воздуха 92 % и температуре 20 °С древесностружечные плиты с повышенным количеством связующего, содержащие расплавленный парафин и парафиновую эмульсию, а также подвергнутые термообработке имеют равновесную влажность 14,5 % [5,6].

Проведенные исследования показали, что при длительной выдержке в среде с высокой относительной влажностью (90 %), исследуемые плитные материалы достигают равновесной влажности около 14 % без связующих веществ и гидрофобизирующих добавок. Данные плиты можно рекомендовать к использованию в строительстве, изготовлении упаковочных материалов и других сферах, где требуются экологически чистые и водостойкие материалы.

#### Библиографические ссылки

1. Дереев С. В., Казицин С. Н. Исследование гигроскопических свойств плит без связующих веществ из механоактивированных древесных опилок // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. – 2019. – С. 208-209.
2. ГОСТ 24816-2014. Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности. М., 2015. 9 с.
3. Казицин С. Н. и др. Разработка режима горячего прессования плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц // Хвойные бореальной зоны. – 2016. – Т. 34. – №. 5-6. – С. 315-318.
4. Ермолин В. Н. и др. Разработка режима гидродинамической активации древесных частиц с целью получения плит без связующих веществ // Хвойные бореальной зоны. – 2017. – Т. 35. – №. 3-4. – С. 79-83.

5. Молдин Б.Д., Отлев И.А. Производство древесностружечных плит, 5-е изд., "Высшая школа";, М., 1983, 216 с

6. Ермолина, А. В. Технология получения теплоизоляционных древесных плит [Текст] : диссертация канд. техн. наук: 05.21.05: защищена 16.03.12 / А. В. Ермолина; СибГТУ. – Красноярск, 2012. – 152 с.

#### References

1. Dereev S. V., Kazitsin S. N. Issledovanie gigroskopicheskikh svoystv plit bez svyazuyushchikh veshchestv iz mekhanoaktivirovannykh drevesnykh opilok // Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki. – 2019. – S. 208-209.

2. GOST 24816-2014. Materialy stroitel'nye. Metod opredeleniya ravnovesnoi sorbtzionnoi vlazhnosti. М., 2015. 9 s.

3. Kazitsin S. N. i dr. Razrabotka rezhima goryachego pressovaniya plit bez svyazuyushchikh veshchestv iz mekhanoaktivirovannykh drevesnykh chastits //Khvoinye boreal'noi zony. – 2016. – Т. 34. – №. 5-6. – S. 315-318.

4. Ermolin V. N. i dr. Razrabotka rezhima gidrodinamicheskoi aktivatsii drevesnykh chastits s tsel'yu polucheniya plit bez svyazuyushchikh veshchestv //Khvoinye boreal'noi zony. – 2017. – Т. 35. – №. 3-4. – S. 79-83.

5. Moldin B.D., Otlev I.A. Proizvodstvo drevesnostruzhechnykh plit, 5-e izd., "Vysshaya shkola";, М., 1983, 216 s

6. Ermolina, A. V. Tekhnologiya polucheniya teploizolyatsionnykh drevesnykh plit [Tekst] : dissertatsiya kand. tekhn. nauk: 05.21.05: zashchishchena 16.03.12 / A. V. Ermolina; SibGTU. – Krasnoyarsk, 2012. – 152 s.

© Казицин С. Н., Тримасова О. В., 2023

УДК 676.154

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗНОЖЕВОЙ РАЗМАЛЫВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ НА ПРОЦЕСС РАЗМОЛА

Е. В. Каплёв, Ю. Д. Алашкевич, Л. В. Юртаева, В. А. Патраков, В. С. Овчинников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 2052727@mail.ru

*В статье построены и проанализированы модели течения волокнистой суспензии в безножевой размалывающей установке типа «струя-преграда» при различных давлениях.*

*Ключевые слова: размол, моделирование, безножевой размол, целлюлоза.*

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN PARAMETERS OF A KNIFE-LESS GRINDING PLANT ON THE GRINDING PROCESS

E. V. Kaplev, Yu. D. Alashkevich, L. V. Yurtayeva, V. A. Patrakov, V. S. Ovchinnikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2052727@mail.ru

*In the article, models of the flow of a fibrous suspension in a knife-less grinding plant of the "jet-barrier" type at various pressures are constructed and analyzed.*

*Keywords: grinding, modeling, knife-free grinding, cellulose.*

Использование альтернативных источников сырья позволяет сохранить часть здоровых лесов, утилизировать некачественное сырье и вторсырье, а также приводит к снижению материальных затрат. Одной из важнейших технологических операций при изготовлении готового продукта из целлюлозы является размол.

Для размола в основном используют ножевые размалывающие аппараты – дисковые и конические мельницы, которые уже подтвердили свою эффективность на практике и давно используются в промышленном производстве бумаги. Но ножевые размалывающие машины имеют ряд характерных недостатков, это раздавливание и рубка волокон в массе, что снижает прочностные характеристики готового продукта и затрудняет процесс размола при использовании макулатуры или целлюлозы, выделенной из однолетних растений и биоповрежденной древесины, также из-за измельчения и укороченных волокон.

Однако есть и альтернатива дисковым и коническим размалывающим машинам – безножевые размалывающие аппараты. Они обеспечивают более щадящий процесс размола с незначительным укорочением волокон в массе и возможности использования коротковолокнистых целлюлозных полуфабрикатов как сырья [1, 2].

В связи с этим в СибГУ им. М.Ф. Решетнева, на кафедре МАПТ ведутся исследования гидромеханических процессов, происходящих при размоле на экспериментальной безножевой установке типа «струя преграда» [3].

Установлено, что волокнистые полуфабрикаты, обработанные способами, исключаящими ножевое воздействие на волокна, более фибриллированы. То есть от волокон полностью или частично отделены фибриллы, что способствует увеличению наружной поверхности волокон и числа свободных гидроксильных групп на их поверхности [4].

С целью исследования различных режимов работы безножевой установки типа «струя-преграда» была построена модель гидроцилиндра, удлинителя и насадки, которая наглядно показала, что про-

исходит с потоком волокнистой суспензии концентрацией 1 % в рабочих органах установки, и в каких участках наиболее высокая скорость и давление, что позволяет установить подходящие параметры в реальном эксперименте, для получения необходимых результатов. Были построены модели при рабочем давлении 4 МПа и 12 МПа. При рабочем давлении 4 МПа, в гидроцилиндре установки типа «струя-преграда» устанавливается ламинарный режим течения (рис. 1).

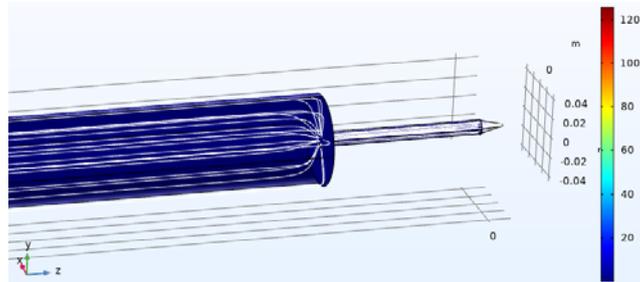


Рис. 1. Потоки волокнистой суспензии в установке типа «струя-преграда» при давлении 4 МПа

Для ламинарного течения волокнистой суспензии (рис. 1) характерна невысокая скорость, при этом у стенок наблюдается прослойка воды, в которой отсутствуют волокна. В центре потока образуется стержень из переплетенных волокон, которые не могут перемещаться друг относительно друга. Для такого режима характерен минимальный градиент скорости у стенок в слое чистой воды

При рабочем давлении 12 МПа, в гидроцилиндре установки типа «струя-преграда» устанавливается турбулентный режим течения волокнистой суспензии (рис. 2).

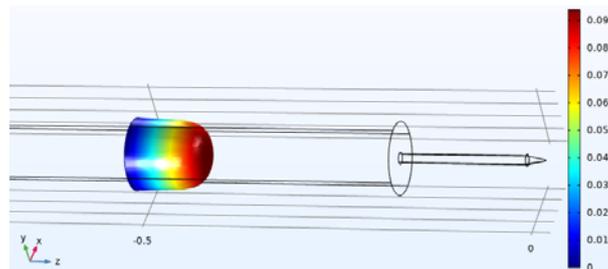


Рис. 2. Скорость волокнистой суспензии в установке типа «струя-преграда» при давлении 12 МПа

В турбулентном течении (рис. 2), полностью разрушается волокнистый стержень. Величина коэффициента трения (динамическая вязкость среды) становится постоянной, причем его значение уменьшается, увеличивается градиент скорости.

Распределение потоков волокнистой суспензии в установке типа «струя-преграда» в месте перехода из гидроцилиндра в удлинитель показано на рис. 3.

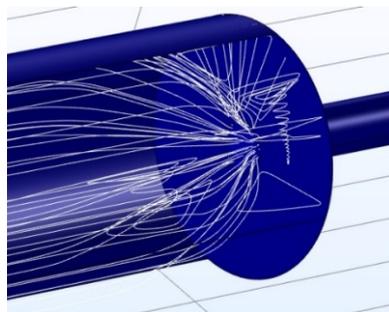


Рис. 3. Потоки волокнистой суспензии в установке типа «струя-преграда» в месте перехода из гидроцилиндра в удлинитель

При анализе изображения видно, что при переходе суспензии из гидроцилиндра в удлинитель происходит внезапное сужение потока, создаются пространства с завихрениями вращающейся жидкости, которые образуются в пристеночном пространстве гидроцилиндра. Эти завихрения образуются в начале удлинителя за счёт того, что при входе в него жидкость продолжает некоторое время двигаться по инерции в направлении центра удлинителя, и основное русло потока ещё некоторое время продолжает сужаться. Т.е., при внезапном сужении потока возникает как – бы два подряд идущих местных сопротивления. Местное сопротивление за счёт сужения основного русла и сразу же за ним местное расширение, что приводит к образованию пузырьков [5].

Таким образом, волокнистые полуфабрикаты, обработанные на безножевой размалывающей установке типа «струя-преграда», имеют более высокие прочностные показатели, что позволяет использовать в качестве сырья макулатуру или целлюлозу, выделенную из однолетних растений и биоповрежденной древесины. Были смоделированы и проанализированы режимы течения волокнистой суспензии в безножевой установке типа «струя-преграда» при различных давлениях.

### Библиографические ссылки

1. Алашкевич Ю. Д., Марченко Р.А., Решетова Н.С. Процесс безножевой обработки волокнистой суспензии в установке «струя-преграда». // Химия растительного сырья. Барнаул. 2009. № 2. С. 157–163.
2. Ерофеева А.А. Безножевой размол волокнистых полуфабрикатов с учетом реологических особенностей суспензий: дис. к.т.н. – Красноярск., 2012. 135 с.
3. Алашкевич Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: Дис. .докт. техн.наук. -Л., 1980. 334 с.
4. Кутовая Л.В. Комплексный параметр процесса обработки волокнистых суспензий безножевым способом в установке типа «струя-преграда»: дис. к.т.н. – Красноярск., 1998. 150 с.
5. Канавеллис Р. Струйный удар и кавитационное разрушение. // Теоретические основы инженерных расчетов. – М., 1968.-Т.90., № 3- с. 39-98.

### References

1. Alashkevich Yu. D., Marchenko R.A., Reshetova N.S. The process of knife-free processing of fibrous suspension in the "jet-barrier" installation. // Chemistry of vegetable raw materials. Barnaul. 2009.No. 2. pp. 157-163.
2. Erofeeva A.A. Knife-free grinding of fibrous semi-finished products taking into account rheological features of suspensions: dis. Candidate of Technical Sciences – Krasnoyarsk., 2012. 135 p.
3. Alashkevich Yu. D. Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines: Diss. .doct. technical sciences. -L., 1980. 334 p.
4. Kutovaya L.V. Complex parameter of the process of processing fibrous suspensions by a knife-free method in a "jet-barrier" type installation: dis. Candidate of Technical Sciences – Krasnoyarsk., 1998. 150 p.
5. Kanavellis R. Jet impact and cavitation destruction. // Theoretical foundations of engineering calculations. – M., 1968.-Vol. 90., No. 3- pp. 39-98.

© Каплёв Е. В., Алашкевич Ю. Д., Юртаева Л. В., Патраков В.А., Овчинников В. С., 2023

УДК 676.15

## ВЛИЯНИЕ МЕЖНОЖЕВОГО ЗАЗОРА ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА КАЧЕСТВО БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

А. А. Карелина\*, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: karelina.alexandra@mail.ru

*Влияние межножевого зазора – тема, изучаемая во многих научных работах. В данной статье исследуется влияние зазора между ножами ротора и статора лабораторной дисковой мельницы при размоле массы высокой концентрации из технической конопли.*

*Ключевые слова: волокнистая масса высокой концентрации, массный размол, дисковая мельница, недревесное сырье, техническая конопля.*

## INFLUENCE OF THE GAP OF A DISC MILL ON THE QUALITY OF PAPER PRODUCTS

A. A. Karelina\*, Y. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov, K. A. Khokhlov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*The effect of knife gap is a topic studied in many scientific papers. This article examines the effect of the gap between the blades of the rotor and stator of a laboratory disc mill when refining a high consistency mass of industrial hemp.*

*Keywords: high consistency pulp, mass refining, disc mill, annuals plants, technical hemp.*

В прошлом веке древесина зарекомендовала себя как основной источник волокна на рынке целлюлозы и бумаги. Технологические инновации привели к экономическому преимуществу древесины перед сельскохозяйственными волокнами, которые ранее использовались в промышленности. Недревесные источники волокна для производства бумаги пересматриваются в качестве одного из вариантов повышения конкурентоспособности целлюлозно-бумажной промышленности, особенно в связи с тем, что источники древесного волокна становятся все более дефицитными.

Недревесные растения (лен, конопля, кенаф и др.) – ценное сырье, пригодное для получения высококачественной бумаги и упаковки. Преимуществом и ценностью такого сырья перед древесиной является то, что оно содержит луб с очень прочными и длинными волокнами. Также важно и то, что целлюлозосодержащее сырье недревесных культур можно возобновлять ежегодно, а для выращивания древесины требуются многие годы, прежде чем она станет пригодной для получения целлюлозы.

Одним из наиболее подходящих недревесных растений является техническая конопля. Лубяные волокна конопли содержат в пределах 70% целлюлозы и имеют длину 20 мм, что значительно превышает аналогичные показатели у древесины [1].

Конопляная бумага служит дольше, чем древесная и не желтеет со временем. Также конопляная бумага не требует токсичных отбеливающих веществ. А ещё химические вещества, используемые при производстве конопляной бумаги, гораздо менее ядовиты, чем химические вещества, используемые при производстве бумаги из древесной массы [2].

Именно благодаря высокой прочности и экологическим показателям технической конопли бумажную продукцию из нее можно путём размала без использования химической обработки.

Размол является одной из важнейших технологических операций, предопределяющих свойства готовой продукции. Этот процесс наиболее энергоемкий в бумажном производстве, на его осуществление расходуется до 60-70% энергии от общего потребления при изготовлении бумаги [3].

Однако для уменьшения энергозатрат и сохранения исходной длины волокна целесообразно использовать размол массы высокой концентрации.

Основными факторами процесса размола являются межножевой зазор, скорость размалывающих органов, температура нагрева массы, конструкция размалывающих органов, концентрация волокнистой массы.

В данном исследовании оценивается межножевой зазор, для этого на кафедре машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева была разработана лабораторная дисковая мельница с возможностью регулирования таких параметров как скорость вращения ротора, межножевой зазор, скорость подачи шнекового питателя.

Предподготовка сырья проводится путем измельчения лубяных волокон в молотковой дробилке и последующим их замачиванием.

Размол проводится при концентрации волокнистой массы 10%, скорости вращения ротора 2500 об/мин и межножевом зазоре 1 мм и 1,5 мм.

На рис. 1 представлен график зависимости разрывной длины от степени помола при межножевом зазоре 1,5 мм и 1 мм.

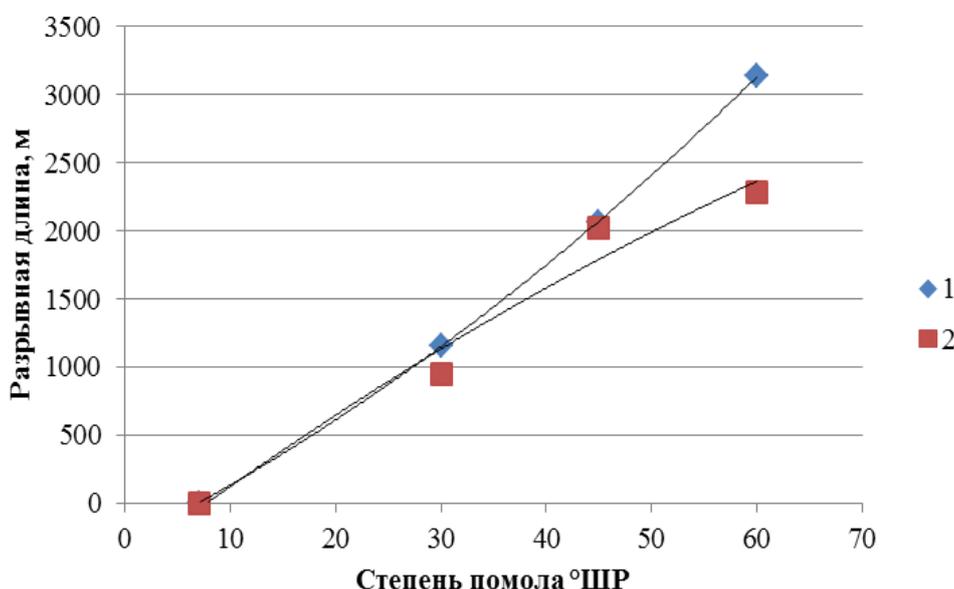


Рис. 1. График зависимости разрывной длины от степени помола:  
1 – при межножевом зазоре 1,5 мм; 2 – при межножевом зазоре 1 мм

Из рисунка видно, что качественный характер зависимостей близок к линейному, однако количественно они имеют отличия. Бумажные отливки, полученные при размоле волокнистой массы с межножевым зазором 1,5 мм, имеют более высокую прочность на разрыв.

Межножевой зазор оказывает значительное влияние на свойства готовой продукции. С увеличением зазора увеличивается фибриллирующее воздействие на волокно и снижается его укорочение [4]. Это связано с тем, что волокно в большей степени подвергаются истиранию друг о друга и многократному скручиванию, нежели разке о кромки ножей гарнитуры. В свою очередь это способствует улучшению прочностных характеристик готового продукта [5].

Межножевой зазор является одним из ключевых факторов процесса размола. Регулировка межножевого зазора наряду с другими факторами размола может помочь достичь желаемых характеристик волокнистой массы и необходимого качества бумажной продукции.

#### Библиографические ссылки

1. Werf, H.V., Veen, J.H., Bouma, A.T., & Cate, M.T. (1994). Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as a raw material for paper. *Industrial Crops and Products*, vol. 2, pp. 219-227. DOI:10.1016/0926-6690(94)90039-6

2. Małachowska, E., Przybysz, P.J., Dubowik, M., Kucner, M., & Buzala, K.P. (2015). Comparison of papermaking potential of wood and hemp cellulose pulps. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*, vol. 91, n. pag.
3. Примаков С.Ф. Производство бумаги,- М.: Лесная пром-сть, 1987. – 222 с.
4. Справочник бумажника технолога : в 4 томах. Том I / редактор: С.А. Пузырева. – Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1956. 549 с.
5. Кларк Д. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний): пер. с англ. А.В. Оболенской и Г.А. Пазухиной. – М.: Лесная пром-сть, 1983. – 456 с.

### References

1. Werf, H.V., Veen, J.H., Bouma, A.T., & Cate, M.T. (1994). Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as a raw material for paper. *Industrial Crops and Products*, vol. 2, pp. 219-227. DOI:10.1016/0926-6690(94)90039-6
2. Małachowska, E., Przybysz, P.J., Dubowik, M., Kucner, M., & Buzala, K.P. (2015). Comparison of papermaking potential of wood and hemp cellulose pulps. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*, vol. 91, n. pag.
3. Primakov S.F. Paper production, – М.: Forest industry, 1987. – 222 p.
4. *Technologist's Wallet Handbook: in 4 volumes. Volume I* / editor: S.A. Puzyreva. – Moscow ; Leningrad: Goslesbumizdat, 1956. 549 p.
5. Clark D. Cellulose technology (science of pulp and paper, mass preparation, processing it into paper, test methods): per. from English. A.V. Obolenskaya and G.A. Pazukhina. – М.: Forest industry, 1983. – 456 p.

© Карелина А. А., Алашкевич Ю. Д., Кожухов В. А., Хохлов К. А., 2023

УДК 665.642.2

## ЭКСТРАКЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ\*

А. С. Косицына<sup>1</sup>, М. Е. Юмашев<sup>2</sup>, С. С. Косицына<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
\*skositsyna@sfu-kras.ru

*Приведены результаты определения материального баланса выделения растительных масел непрерывной экстракцией в экстракторе Сокслета из различных масленичных культур гептаном, толуолом, ацетоном и трихлорметаном.*

*Ключевые слова: экстракция, рапс, рыжик, горчица, масло.*

## ANALYSIS OF SOFT CRACKING PRODUCTS OF COMMERCIAL POLYOLEFINS BY IR SPECTROSCOPY

A. S. Kositsyna<sup>1</sup>, M. E. Yumashev<sup>2</sup>, S. S. Kositsyna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
79, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
\*skositsyna@sfu-kras.ru

*The results of determining the material balance of the release of vegetable oils by continuous extraction in a Soxhlet extractor from various oilseed crops with heptane, toluene, acetone and trichloromethane are presented.*

*Ключевые слова: extraction, rapeseed, camelina, mustard, oil.*

Монокарбоновые жирные кислоты широко применяются в бумажной, резиновой, косметической, энергетической промышленности, а также для производства пластмасс, смазок, различных покрытий и поверхностно-активных веществ. До 40% жирных кислот производят из растительных масел. Для этого жиры, растительные масла или их композиции подвергают безреактивному гидролизу при температуре 225°C в автоклавах периодического действия с последующей дистилляцией полученных сырых жирных кислот [1].

подавляющее большинство растительных масел производят горячим отжимом семян масленичных культур. Основным недостатком такого метода является значительно более низкий выход целевого продукта по сравнению с применением экстракции.

Целью данной работы являлся поиск наиболее эффективного растворителя для извлечения растительного масла из семян масленичных культур.

---

\* Исследования выполнены по государственному заданию Минобрнауки России по проекту «Разработка комплекса научно-технических решений в области создания биотоплив и оптимальных биотопливных композиций, обеспечивающих возможность трансформации потребляемых видов энергоносителей в соответствии с тенденциями энергоэффективности, снижения углеродного следа продукции и использования видов топлива альтернативных ископаемому» (Контракт FSRZ-2021-0012) в научной лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета, созданной в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь».

Навеска семян измельчалась в лабораторной мельнице, далее выполнялась экстракция в экстракторе Сокслета до полного обесцвечивания растворителя. Полученный экстракт подвергали вакуумной дистилляции на водяной бане и определяли выход извлеченного масла в расчете на загруженные семена. Массовое соотношение сырье/экстрагент – 1/5.

Далее из масла омылением извлекали жирные кислоты, определяли выход по отношению к массе загруженных семян.

В качестве сырья использовали семена рапса, рыжика, горчицы. В качестве экстрагентов – гексан (алифатический растворитель), толуол (ароматический растворитель), ацетон (полярный апротонный растворитель акцептор протона) и трихлорметан (малополярный растворитель донор протона).

В табл. 1,2 показаны результаты расчета выхода масла и жирных кислот, полученных при проведении экспериментов.

Таблица 1

**Выход масла из растительного сырья при экстракции различными растворителями**

Экстрагент Сырье	Гексан	Толуол	Ацетон	Трихлорметан
Рапс	46,9	52,5	44,0	73,0
Рыжик	45,0	43,9	37,3	54,7
Горчица	31,0	26,9	22,7	42,0

Таблица 2

**Выход жирных кислот из растительного сырья при экстракции различными растворителями**

Экстрагент Сырье	Гексан	Толуол	Ацетон	Трихлорметан
Рапс	8,8	11,3	15,2	21,3
Рыжик	5,5	9,8	10,4	18,6
Горчица	5,3	10,2	9,3	15,9

Наибольший выход наблюдается при использовании трихлорметана, как по экстракции масла, так и по выходу жирных кислот. С учетом того, что выход рапсового масла при отжиме составляет не более 45%, в среднем данный метод извлечения масел эффективнее в 1,5 раза. Однако по отношению выход жирных кислот/выход масла наибольшую селективность проявляет ацетон, а наименьшую – гексан.

**Библиографическая ссылка**

1. Рациональное использование жировых отходов в технических целях / В. С. Мачигин, А. В. Губанов // Вестник ВНИИЖ. 2009. № 1.

**Reference**

1. Machigin V. S., Gubanov A. V. [Racional'noe ispol'zovanie zhirovyyh othodov v tekhnicheskikh celyah] *Vestnik VNIIZH*. 2009. № 1. (In Russ.).

© Косицына А. С., Юмашев М. Е., Косицына С. С., 2023

УДК 674.816.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ ОТХОДОВ МЕБЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

А. И. Криворотова\*, Н. А. Федосеев, С. В. Буглаев, А. Е. Тюменцева, А. Ю. Лопатин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: tkmkai@mail.ru

*В работе представлены результаты исследования вопроса переработки вторичных отходов мебельных производств в древесно-полимерный композит. Изучены свойства композита в зависимости от видового состава отходов.*

*Ключевые слова: мебельное производство, отходы, древесно-полимерный композит, прочность, аддитивы, добавки.*

## INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF RECYCLING SECONDARY WASTE OF FURNITURE PRODUCTION

A. I. Krivorotova\*, N. A. Fedoseev, S. V. Buglaev, A. E. Tyumentseva, A. Y. Lopatin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: tkmkai@mail.ru

*The paper presents the results of a study of the issue of recycling secondary waste from furniture production into a wood-polymer composite. The properties of the composite depending on the species composition of the waste have been studied.*

*Keywords: furniture production, waste, wood-polymer composite, strength, additives, additives.*

Одним из способов привлечения дополнительных ресурсов является комплексная переработка древесины. В тоже время следует отметить, что при дальнейшей переработке древесных материалов, образующиеся отходы (также представляющие довольно существенную часть от объемов заготовляемой древесины) практически не перерабатываются. К таким отходам относятся отходы мебельных производств, содержащие древесину в различных ее видах: массивную древесину, отходы фанеры, древесностружечных и древесноволокнистых плит, МДФ, синтетического шпона, кромочного материала и т. п. В результате проведенного анализа было определено, что наиболее перспективным вариантом переработки таких отходов является производство древесно-полимерных композитов (ДПК) [1].

Для получения качественного ДПК необходимо применять грамотно подобранные аддитивы, это особенно важно при работе с сырьём, представляющим из себя отходы мебельных производств, так как данное сырьё имеет разнообразный химический состав. Аддитивы в ДПК можно подразделить на антиоксиданты, лубриканты, красители, связующие агенты и модифицирующие добавки.

Достаточное количество антиоксидантов в полимере определяет срок службы композита, его качество и долговечность. Отсутствие антиоксидантов приводит к тому, что полимер, в процессе экструзии или под воздействием ультрафиолета становится хрупким, и может рассыпаться в пыль. Обычно используют два типа антиоксидантов 1010 и 168, или два в одном [2]. В России при производстве ДПК в основном используют связующие вещества на основе ПНД (HDPE) с привитым малеиновым ангидридом [3]. Кроме связующих агентов на основе малеинового ангидрида могут применяться связующие агенты на основе органосиланов и хлорированных парафинов [3].

В качестве внешних и внутренних лубрикантов чаще всего используют полиэтиленовый воск и стеариновую кислоту. Лубриканты снижают забивание отверстий в калибраторе и сокращают число вынужденных остановок линии для чистки калибраторов [2–4].

Красителями, как правило, являются порошковые железистоокисные пигменты. Большинство из них производится в Китае. Для окрашивания в черные тона применяется технический углерод, который, также обеспечивает отличную защиту от УФ-излучения [5]. Можно применять так называемые «мас-тербатчи» – изготовленные на специальном оборудовании концентраты в виде гранул. Они позволяют практически бесконечно расширить цветовую гамму, но стоят дорого [5].

Для обоснования возможности использования отходов мебельных производств при изготовлении древесно-полимерных композитов были изготовлены образцы ДПК на основе стандартной древесной муки (состав 1), древесной муки с добавлением муки из отходов мебельных производств в соотношении 50/50 (состав 2) и муки из отходов мебельных производств (состав 3). Все образцы имеют плотность от 1050 до 1080 кг/м<sup>3</sup>. Изменение свойств ДПК на основе отходов мебельных производств может быть связано в первую очередь с наличием в составе муки отвержденных полимеров из клеевого состава, являющегося связующим компонентом в древесностружечных плитах, измельченных облицовочных полимерных или бумажных пленок, кромок и т.п. Таким образом, в составе древесно-полимерной композиции увеличивается доля компонентов (полимеров, смол и т. д.) традиционно не используемых в производстве ДПК. На рис. 1 представлена гистограмма прочности изготовленных композитов на статический изгиб.

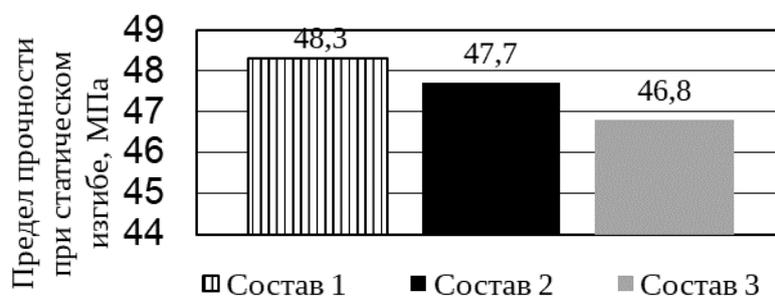


Рис. 1. Гистограмма прочности образцов древесно-полимерного композита

Как видно, прочность образцов практически одинакова, однако с увеличением количества древесных частиц, изготовленных из отходов мебельных производств, наблюдается незначительное снижение прочности. Тем не менее, все представленные образцы достигают от 50 % до 70 % прочности теоретического максимума, что является достаточным для обеспечения требуемого запаса прочности.

По результатам эксперимента были сделаны выводы: возможность использования отходов мебельных производств при изготовлении древесно-полимерных композитов вполне обоснована; прочность древесно-полимерных композитов незначительно снижается при использовании в качестве наполнителя отходов мебельных производств, что в первую очередь связано с изменением компонентного и физического состава древесной муки.

#### Библиографические ссылки

1. Одношаговая экструзионная линия SH 65/120 по производству ДПК на основе ПЭ/ПП. – Текст : электронный // Чи-лайн : сайт оборудования из Китая. – 2023. – URL: <https://chi-line.ru/katalog-oborudovaniya/extrusion-lines-for-wpc/odnoshagovaja-linija-po-proizvodstvu-dpk-na-osnove-pe.html> (дата обращения : 22.08.2023).

2. Щербинина, Е. М. Производство древесно-полимерных композитов Часть 1. Сырье, технологии, оборудование для производства ДПК / Е. М. Щербинина. – Текст : электронный // ЛесПромИнформ. – 2016. – №5 (119). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4443> (дата обращения: 20.08.2023).

3. Экструзионная линия SJ 65/132 для производства декинга ДПК. – Текст : электронный // ЧИ-ЛАЙН : сайт оборудования из Китая. – 2023. – URL: <https://chi-line.ru/katalog-oborudovaniya/extrusion-lines-for-wpc/line-for-wpc-wood-plastic-composite-sjsz-65-132.html> (дата обращения : 10.09.2023).

4. Экструзионная линия для производства ДПК SJZ65 / 132. – Текст : электронный // Сибирская полимерная компания : сайт. – 2023. – URL: <https://sib-pk.com/produkcija/proizvodstvennyje-linii/proizvodstvo-profilej-panelei-i-listov/proizvodstva-profilej-dpk/ekstruzionnaya-liniya-dlya-proizvodstva-dpk-sjz65-132/> (дата обращения : 05.09.2023).

5. Экструзионная линия для производства дпк SJZ65/132. Текст : электронный // Сибирская полимерная компания : сайт. – 2023. – URL: [https://www.avito.ru/moskovskaya\\_oblast\\_krasnogorsk/oborudovanie\\_dlya\\_biznesa/ekstruzionnaya\\_liniya\\_dlya\\_proizvodstva\\_dpk\\_sjz65132\\_2170343730](https://www.avito.ru/moskovskaya_oblast_krasnogorsk/oborudovanie_dlya_biznesa/ekstruzionnaya_liniya_dlya_proizvodstva_dpk_sjz65132_2170343730) (дата обращения : 30.08.2023).

## References

1. Unidirectional electrical protection line Sh 65/120 for the production of WPC based on pE/PP. – Text : electronic // Chi-line : equipment website from China. – 2023. – URL: <https://chi-line.ru/katalog-oborudovaniya/extrusion-lines-for-wpc/odnoshagovaja-linija-po-proizvodstvu-dpk-na-osnove-pe.html> (date of reference : 08/22/2023).

2. Shcherbinina, E. M. Production of wood-polymer composites Part 1. Raw materials, technologies, equipment for the production of WPC / E. M. Shcherbinina. – Text : electronic // LesPromInform. – 2016. – №5 (119). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4443> (date of application: 08/20/2023).

3. Transport line SJ 65/132 for the production of WPC. – Text : electronic // CHI-LINE : equipment website from China. – 2023. – URL: <https://chi-line.ru/katalog-oborudovaniya/extrusion-lines-for-wpc/line-for-wpc-wood-plastic-composite-sjsz-65-132.html> (accessed : 09/10/2023).

4. Transport line for the production of WPC SJZ65 / 132. – Text : electronic // Siberian Polymetallic Company : website. – 2023. – URL: <https://sib-pk.com/produkcija/proizvodstvennyje-linii/proizvodstvo-profilej-panelei-i-listov/proizvodstva-profilej-dpk/ekstruzionnaya-liniya-dlya-proizvodstva-dpk-sjz65-132/> (accessed : 05.09.2023).

5. Processing line for the production of WPC SJZ65/132. Text : electronic // Siberian Polymer Company : website. – 2023. – URL: [https://www.avito.ru/moskovskaya\\_oblast\\_krasnogorsk/oborudovanie\\_dlya\\_biznesa/ekstruzionnaya\\_liniya\\_dlya\\_proizvodstva\\_dpk\\_sjz65132\\_2170343730](https://www.avito.ru/moskovskaya_oblast_krasnogorsk/oborudovanie_dlya_biznesa/ekstruzionnaya_liniya_dlya_proizvodstva_dpk_sjz65132_2170343730) (accessed : 30.08.2023).

© Буглаев С. В., Криворотова А. И., Федосеев Н. А., Тюменцева А. Е., Лопатин А. Ю., 2023

УДК 615.014

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И АНАЛИЗ ЭКСТРАКТА РОДИОЛЫ РОЗОВОЙ

Н. Н. Кульшманова<sup>1</sup>, Э. Ф. Степанова<sup>2</sup>, А. А. Кукушкин<sup>3</sup>, С. Е. Стороженко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого  
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, зд. 1

<sup>2</sup>Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ФГБОУ ВО «Волгоградский  
государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Российская Федерация, 3573352, Ставропольский край, г. Пятигорск, пр-кт Калинина, д. 11

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

*Рассмотрены результаты анализа влияния процесса упаривания и сушки экстракта родиолы розовой на содержание биологически активных веществ.*

*Ключевые слова: адаптоген, родиола розовая, густой экстракт, сухой экстракт.*

## TECHNOLOGY FOR PREPARATION AND ANALYSIS OF RHODIOLA ROSEA EXTRACT

N. N. Kulshmanova<sup>1</sup>, E. F. Stepanova<sup>2</sup>, A. A. Kukushkin<sup>3</sup>, S. E. Storozhenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Professor V.F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University,  
1 building, Partizana Zheleznyaka str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

<sup>2</sup>Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute –  
branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Volgograd State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation  
11, Kalinina Ave., Stavropol Territory, Pyatigorsk, 3573352, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*The results of an analysis of the influence of the process of evaporation and drying of Rhodiola rosea extract on the content of biologically active substances are considered.*

*Keywords: adaptogen, Rhodiola rosea, thick extract, dry extract.*

**Введение.** Одной из приоритетных задач отечественной фармацевтической промышленности является выпуск новых, жизненно необходимых лекарственных средств, создание конкурентоспособной продукции, направленной на лечение и профилактику заболеваний. Использование природных лекарственных средств сегодня является актуальным, учитывая доступность, воспроизводимость сырья и простоту его переработки. Особый интерес, связан с уникальными свойствами фитопрепаратов такими как тонизирующий, антиоксидантный и адаптогенный эффекты. К наиболее важным адаптогенам растительного происхождения, получившим широкое распространение в фармакотерапии, относятся растения, произрастающие на Дальнем Востоке и в Сибири, и в частности родиола розовая [1-2].

Родиола розовая, или золотой корень (*Rhodiola rosea* L.), семейства толстянковые – официальное лекарственное растение, с ярко выраженным адаптогенными и тонизирующим действием. Лекарственным сырьем являются корневища и корни, которые заготавливают с конца цветения до завершения вегетации растения. Основной сырьевой объем сконцентрирован на территории Российской Федерации, что позволяет уменьшить количество затрат на приобретение лекарственного сырья, обеспечивая доступность [3].

Фармакологическая активность родиолы розовой обусловлена содержащимися в ней т биологически активными соединениями такими, как фенилпропаноиды: розавин, розин, розарин и фенилоспиртами: тирозол, салидрозид. Отмечено, что розавин является лабильным соединением, при несоблю-

дении условий заготовки и правил хранения сырья разрушается. Кроме того, процесс переработки сырья может оказывать влияние на стабильность розавина и его содержание в препарате, что необходимо учитывать при разработке технологического процесса [4].

Единственным препаратом, получаемым из корневищ и корней родиолы розовой, является жидкий экстракт (1:1) для приема внутрь. Однако данная лекарственная форма не является оптимальным. Существенным недостатком лекарственной формы является ограничения по приему препарата. Из-за раздражающего действия препарат не рекомендуется принимать людям с заболеваниями желудочно-кишечного тракта. Вследствие содержания этилового спирта в составе препарата, он так же противопоказан к применению в педиатрии и у лиц осуществляющих деятельность, требующую повышенного внимания.

Таким образом, разработка альтернативной лекарственной формы родиолы розовой является актуальной задачей.

Целью исследования является изучение влияния стадии упаривания и сушки на качественный состав экстрактов (густого, сухого) родиолы розовой.

Первичное извлечение из родиолы розовой проводили 40% этанолом методом бисмацерации. Полученное извлечение отстаивали и фильтровали, далее упаривали на роторном испарителе до состояния густого экстракта. Анализ влажности густого экстракта проводили согласно ОФС 1.2.1.0010.15 «Потеря в массе при высушивании» способ 1. Влажность густого экстракта составила 22,4%, что соответствует требованиям.

Сухой экстракт получали высушиванием первичного извлечения из родиолы розовой в сушильном шкафу до содержания влаги менее 5 %. Влажность сухого экстракта определяли по методике, указанной выше, влажность составила 4,2%, что соответствует требованиям. Следующий этап исследования заключался в определении качественного состава полученных экстрактов, а именно идентификации салидрозида и розавина методом ВЭЖХ. Хроматографирование проводили на аппарате Милихром А-02, колонка «ProntoSil-120-5-C18», элюент А – вода, элюент В – ацетонитрил, подготовку проб проводили по методике [5]. На рис. 1 представлены хроматограммы исследуемых густого (а) и сухого (б) экстрактов. На рис. 2 представлены эталонные [5] хроматограммы стандартных образцов салидрозида (а) и розавина (б).

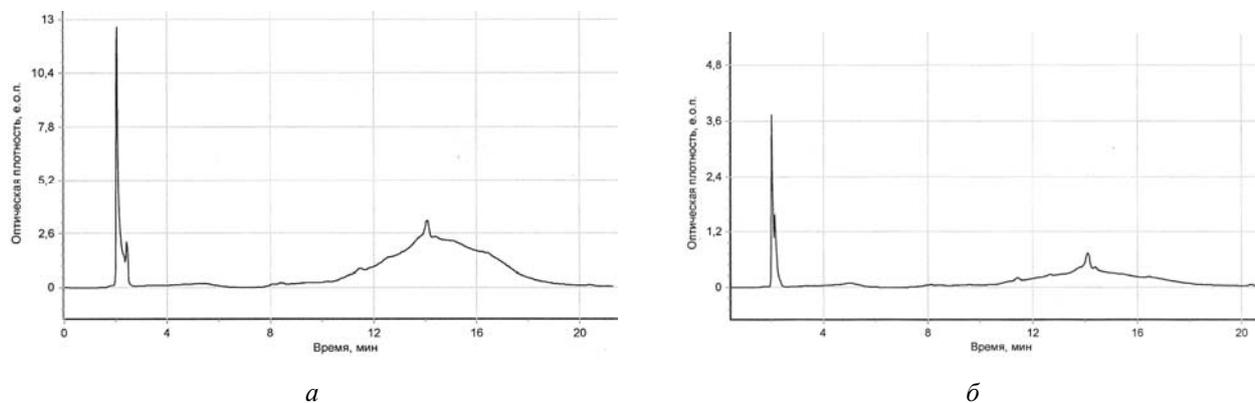


Рис. 1. Хроматограммы исследуемых образцов густого (а) и сухого (б) экстрактов родиолы розовой.

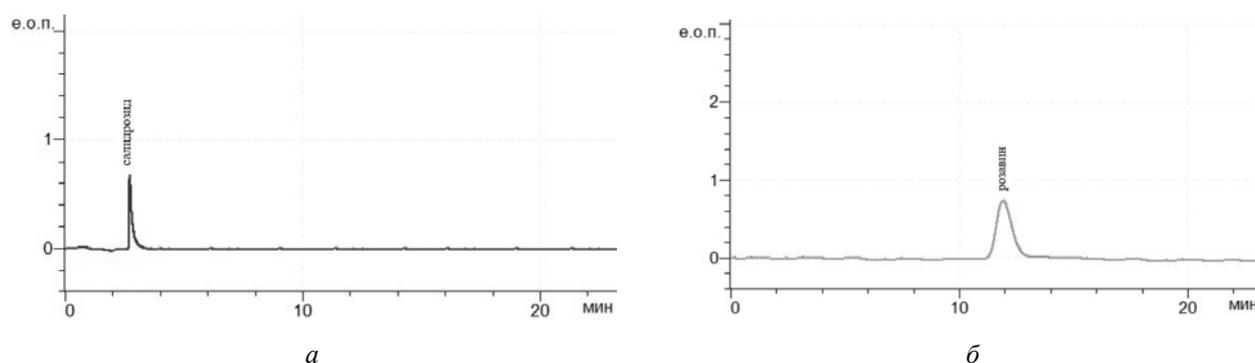


Рис. 2. Хроматограммы стандартных образцов салидрозида (а) и розавина (б)

Анализ хроматограмм подтверждает наличие характерных для родиолы розовой биологически активных веществ: салидрозида и розавина. Таким образом, предложенные методы упаривания и сушки не влияют на качественный состав густого и сухого экстракта. Полученные экстракты могут быть использованы в качестве исходного материала для разработки новых лекарственных форм.

### Библиографические ссылки

1. Исследования по расширению спектра использования экстрактов родиолы розовой, липы сердцевидной и астрагала эспарцетного в медицинской практике / А.М. Темирбулатова, Э.Ф. Степанова, Д.В. Веселова, и др. // Научные результаты биомедицинских исследований. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 84-93.
2. Anti-inflammatory effects of *Rhodiola rosea* L.: A review / Pu W.L., Zhang M.Y., Bai R. Y., et al. // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. – 2020. – Vol. 121. – 109552.
3. Сравнительный анализ номенклатуры лекарственного растительного сырья, используемого в отечественной и мировой фармакопейной практике / Л. Н. Фролова, Е. Л. Ковалева, Е. И. Саканян [и др.] // *Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств*. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 29-40.
4. Куркин В.А. Родиола розовая (золотой корень): стандартизация и создание лекарственных препаратов: монография / В.А. Куркин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара : ООО «Офорт» : 2020. – 240 с.
5. Куркин В.А., Рязанова Т.К. Вопросы стандартизации лекарственных препаратов родиолы розовой // *Фармация и фармакология*. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 185-194.

### References

1. Research to expand the range of use of extracts of *Rhodiola rosea*, *Linden cordate* and *Astragalus sainfoin* in medical practice / A.M. Temirbulatova, E.F. Stepanova, D.V. Veselova, etc. // *Scientific results of biomedical research*. – 2019. – Т. 5, No. 1. – P. 84-93.
2. Anti-inflammatory effects of *Rhodiola rosea* L.: A review / Pu W.L., Zhang M.Y., Bai R.Y., et al. // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. – 2020. – Vol. 121. – 109552.
3. Comparative analysis of the nomenclature of medicinal plant raw materials used in domestic and world pharmacopoeial practice / L. N. Frolova, E. L. Kovaleva, E. I. Sakanyan [etc.] // *Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medicinal Products. Regulatory research and examination of medicines*. – 2020. – Т. 10, No. 1. – P. 29-40.
4. Kurkin V.A. *Rhodiola rosea* (golden root): standardization and creation of medicinal products: monograph / V.A. Kurkin. – 2nd ed., revised. and additional – Samara: Ofort LLC: 2020. – 240 p.
5. Kurkin V.A., Ryazanova T.K. Issues of standardization of *Rhodiola rosea* medicinal preparations // *Pharmacy and pharmacology*. – 2021. – Т. 9, No. 3. – P. 185-194.

© Кульшманова Н. Н., Степанова Э. Ф., Кукушкин А. А., Стороженко С. Е., 2023

УДК 674.81;674.049.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ МАССЫ В КАЧЕСТВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО КОМПОЗИТА

В. А. Острякова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ostryakova81@bk.ru

*В данной работе представлены результаты исследований возможности получения древесного композиционного материала, состоящего из древесной стружки (наполнитель) и механоактивированной активированной древесной массы (матрица). Полученный материал по физико-механическим свойствам схож с плитами ДСтП. Структурообразование данного материала происходит за счет удаления влаги.*

*Ключевые слова: связующее, механоактивированная масса, разбухание, фибрилляция, матрица, наполнитель.*

## USE OF MECHANICALLY ACTIVATED MASS AS A BINDER FOR WOOD COMPOSITE PRODUCTION

V. A. Ostryakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ostryakova81@bk.ru

*This paper presents the results of research into the possibility of obtaining wood composite material consisting of wood chips (filler) and mechanically activated wood pulp (matrix). The obtained material by physical and mechanical properties is similar to fiberboard. Structural formation of this material occurs due to moisture removal.*

*Keywords: binder, mechanically activated mass, swelling, fibrillation, matrix, filler.*

В настоящее время производство древесных плит является одной из динамично развивающихся направлений деревообработки. Это в полной мере относится к древесностружечным плитам (ДСтП). Они имеют сравнительно высокую прочность, надежность, жесткость при средней плотности (550 ... 820 кг/м<sup>3</sup>) и большой толщине (от 10 до 42 мм). Поэтому они широко применяются в производстве мебели, отделке, строительстве.

В производстве таких плит, как правило, используются связующие, на основе синтетических терморезактивных полимеров, содержащих свободный формальдегид. Поэтому плиты являются основными источниками выделения формальдегида в жилых помещениях [1,2]. Это предопределяет поиск новых решений, направленных на производство экологически безопасных и поддающихся глубокому рециклингу плитных материалов.

На сегодняшний день активно развивается направление получения материалов без связующих веществ, структурообразование которых происходит за счет аутогезионных взаимодействий между компонентами.

Механоактивация древесины является одним из перспективных способов обработки. При таком воздействии на древесину, происходит её фибриллирование за счет частичного расслоения клеточных стенок на отдельные пучки фибрилл. В результате образуются новые межфазные поверхности с активными функциональными группами, которые ранее участвовали в формировании надмолекулярных структур компонентов клеточной стенки [3]. Но следует отметить, что гидродинамическая обработка древесного сырья требует существенных энергозатрат. Поэтому не всегда целесообразно изготавливать плиты исключительно из активированной массы. В ряде случаев было бы рациональней получать композит, состоящий из активированной массы (матрица) древесных частиц (наполнитель). Это позволит снизить энергозатраты на единицу продукции и тем самым повысить эффективность. Подобного опыта ранее не было и научных основ создания таких композитов не разработано. Для

проверки гипотезы возможности получения композиционного материала мною были проведены экспериментальные исследования.

Механоактивированную древесную массу смешивали с разным видом наполнителя, а именно волокно, игольчатая стружка и частицы от бегунковой дробилки. Смешивание осуществлялось в соотношении 70/30 (70% – наполнитель; 30% – масса). После этого массу загружали в пресс-форму размером 250×250мм и подпрессовывали при давлении  $P=2,5\text{МПа}$  в течение  $\tau = 5$  мин. Уплотненная композиция помещалась в пресс горячего прессования, где согласно выбранному режиму прессовалась до состояния готовой плиты. В результате были получены плиты толщиной 15 мм и плотностью  $750\text{ кг/м}^3$ . В соответствии со стандартной методикой были проведены исследования разбухания плит. Полученные результаты приведены на рис. 1, из которого следует, что разбухание плит с разволокненным наполнителем соответствует требованиям, предъявляемым к ДСтП. При этом следует отметить аномально высокое разбухание у плит с волокном.

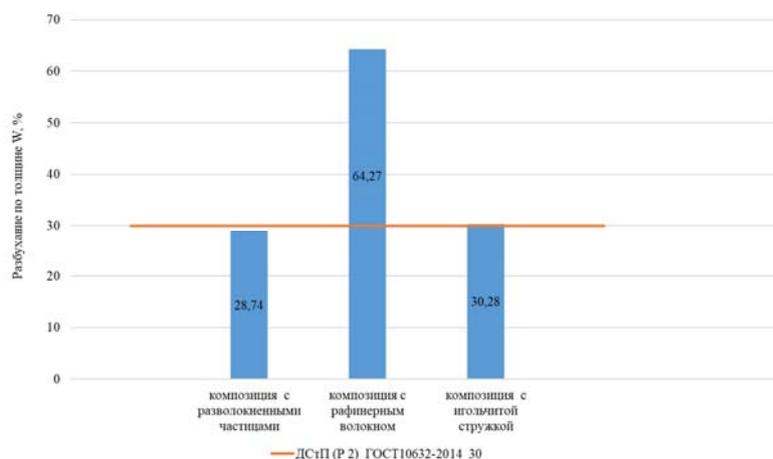


Рис. 1- Влияние вида наполнителя на разбухание плит по толщине

Результаты проведенных исследований говорят о принципиальной возможности получения плитных материалов, состоящих из активированной древесной массы и наполнителя, которые по плотности, прочности, разбуханию соответствуют требованиям, предъявляемым к ДСтП и при этом, имеют класс эмиссии формальдегида E0, что соответствует естественному фону древесины. Поэтому такие плиты могут найти широкое применение.

### Библиографические ссылки

1 Стрелков В. П., Бардонов В. А. Проблемы экологической безопасности древесных плит и мебели в соответствии с новыми требованиями нормативов Таможенного союза //Экологический вестник России, 2013. №. 9. С. 39-44.

2 Отлев И. А., Штейнберг Ц. Б. Справочник по древесностружечным плитам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 233с.

3 Казицин С. Н. Получение древесных плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц : дис. – УГЛТУ, 2018.

### References

1 Strelkov V. P., Bardonov V. A. *Problemy ekologicheskoy bezopasnosti drevesnykh плит i mebeli v sootvetstvi s novymi trebovaniyami normativov Tamozhennogo soyuza* [Problems of environmental safety of wood boards and furniture in accordance with the new requirements of the Customs Union regulations] *Ecological Bulletin of Russia*. – 2013, no 9, pp 39-44.

2 Otlev I. A., Shteynberg Ts. B. *Spravochnik po drevesnostruzhechnym плитам* [Handbook on particle boards], M.: Izd vo" Lesn. Prom., 1983, 233 p.

3 Kazitsin S. N. *Poluchenie drevesnykh плит bez svyazuyushchikh veshchestv iz mekhanoaktivirovannykh drevesnykh chastits* [Preparation of wood boards without binders from mechanically activated wood particles] : dis. – UGLTU, 2018.

УДК 663.479.1/.813

## КВАС НА БЕРЁЗОВОМ СОКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОВОЩНОГО СЫРЬЯ

С. А. Потапенко<sup>1\*</sup>, Д. В. Иванников<sup>2</sup>, О. Н. Еременко<sup>3</sup>, Ж. А. Кох<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>4</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, проспект Мира, 90

\*E-mail: sonypotapenko@yandex.ru

*В работе показана возможность разработки рецептуры инновационного ферментированного напитка на основе берёзового сока и корнеплодов свеклы и моркови.*

*Ключевые слова: функциональные напитки, квас брожения, корнеплоды моркови и свеклы, берёзовый сок.*

## KVASS ON BIRCH JUICE USING VEGETABLE RAW

S. A. Potapenko<sup>1\*</sup>, D. V. Ivannikov<sup>2</sup>, O. N. Eremenko<sup>3</sup>, J. A. Koch<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>4</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Prospect Mira, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: sonypotapenko@yandex.ru

*The paper shows the possibility of developing a recipe for an innovative fermented drink based on birch sap and beetroot and carrot roots.*

*Keywords: functional drinks, fermented kvass, root crops of carrots and beets, birch sap.*

Традиционный квас брожения является одним из самых популярных напитков среди населения. Выбор кваса, как функционального напитка, обусловлен его полезными свойствами и особенностями, которые благотворно влияют на организм и способствуют поддержанию здоровья. Он содержит множество витаминов (в том числе группы В), минералов (калий, фосфор, магний и др.), а также антиоксиданты и ферменты, которые благотворно влияют на организм [1].

Добавление функциональных ингредиентов в квасы брожения может сделать их более полезными для здоровья, привлекательными для потребителей и будет способствовать развитию рынка напитков, ориентированных на здоровый образ жизни. При разработке инновационных напитков необходимо учитывать не только их полезность, но и вкусовые качества, ценовую доступность и безопасность для потребителей [2].

Для обогащения кваса было предложено в рецептуре кваса заменить воду на берёзовый сок, который является полезным напитком и содержит целый комплекс витаминов и минералов, органических кислот и фитонцидов [3]. Концентрат квасного суслу частично заменить корнеплодами свеклы и моркови, которые также богаты витаминами группы В, С и РР, а также каротином и минеральными веществами – железом, калием, магнием, медью и другими [4].

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о перспективности использования корнеплодов моркови и свекла, а также берёзового сока, как функциональных добавок в квасы брожения, позволяющих повысить биологическую и пищевую ценность напитка.

В качестве контрольного образца был получен традиционный хлебный квас брожения на основе готового концентрата квасного суслу (ККС) по классической рецептуре (на 1000 мл): сахар – 50г; ККС – 29,4 г; дрожжи – 2,5 г.

Модифицированный морковно-свекольный квас был получен по следующей рецептуре: берёзовый сок – 1 л, сахар – 25 г, ККС – 15 г, корнеплоды свеклы – 7,5 г, корнеплоды моркови – 7,5 г, дрожжи – 2,5 г.

В полученных образцах кваса были определены органолептические и физико-химические показатели, представленные в таблице 1.

Таблица 1

**Физико-химические показатели квасов брожения**

Показатель	Значение		
	ГОСТ 31494-2012 [5]	квас «Хлебный»	квас «Берёзовый»
Массовая доля сухих веществ, %	не менее 3,5	6,20 ± 0,31	4,9 ± 0,12
Объемная доля спирта, %	не более 1,5	0,60 ± 0,02	0,7 ± 0,01
Кислотность, к. ед.	от 1,5 до 7	2,80 ± 0,11	2,30 ± 0,08
Цветность, см <sup>3</sup> раствора йода концентрацией 0,1 моль/дм <sup>3</sup> на 100 см <sup>3</sup> напитка	-	2,34± 0,05	2,84± 0,08
Витамин В <sub>1</sub> , мг/100 г	-	0,02±0,0004	0,07 ± 0,003
Витамин В <sub>2</sub> мг/100 г	-	0,03 ± 0,0012	0,08 ± 0,002
Витамин С, мг/100 г	-	-	3,98 ± 0,02
Витамин РР, мг/100 г	-	0,20 ± 0,004	0,89 ± 0,02

Результаты анализа показали, что квас «Берёзовый», полученный с использованием морковно-свекольного сырья соответствовал требованиям, предъявляемым к квасам брожения, обладал ярким коричнево-бордовым цветом (нестандартным для кваса) и приятным сбалансированным освежающим вкусом.

Проводя сравнительную оценку характеристик квасов брожения, пришли к выводу, что инновационный напиток брожения не только полностью соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 31494-2012, но и выгодно отличался от контрольного образца по содержанию витаминов В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> и РР, а также по наличию витамина С, который отсутствовал в квасе «Хлебный».

Результаты дегустационной оценки показали, что инновационный ферментированный напиток был достаточно высоко оценен разными возрастными (от 15 до 50 лет) категориями респондентов. Средний балл по таким показателям, как внешний вид, вкус и аромат, а также способность утолять жажду, составил 4,8 из 5,0.

Таким образом, можно сделать вывод, что квас, приготовленный по новой рецептуре на основе корнеплодов моркови и свеклы и берёзового сока, не только хорошо утоляет жажду, имеет приятный вкус, аромат, но и превосходит по пищевой и биологической ценности классический хлебный квас.

**Библиографические ссылки**

1. FoodHealth [Электронный ресурс]. URL: <https://foodandhealth.ru/napitki/kvas/> (дата обращения 06.07.2023).
2. Зуев, Е. Т. Функциональные напитки: их место в концепции здорового питания / Е. Т. Зуев. // Пищевая промышленность, 2004. С. 90-95.
3. Янин, Е. П. Химические элементы в березовом соке как индикаторы техногенного загрязнения окружающей среды / Е. П. Янин. // Экологическая экспертиза, 2012. №1. С. 101-112.
4. Химический состав, питательная ценность и лечебное применение свеклы / С. Р. Гаджиева, Т. И. Алиева, Р. А. Абдуллаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – Т. 5, №85. – С. 67-69.
5. ГОСТ 31494 – 2012 Квасы. Общие технические условия. = Kvases. General Specifications Введен 01.07.13. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 октября 2012 г. № 549-ст. Москва : Стандартинформ, 2013. 6 с.

### References

1. Electronic textbook FoodHealth. Available at: <https://foodandhealth.ru/napitki/kvas/> (accessed 06.07.2023).
2. Zuev, E. T. *Funktsional'nye napitki: ikh mesto v kontseptsii zdorovogo pitaniya*. Pishchevaya promyshlennost', 2004, p. 90-95.
3. Yanin, E. P. *Khimicheskie elementy v berezovom soke kak indikator tekhnogenogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy*. Ekologicheskaya ekspertiza, 2012. №1. p. 101-112.
4. Gadzhieva S. R., Alieva T. I., Abdullaev R. A. [Khimicheskiy sostav, pitatel'naya tsennost' i lechebnoe primeneniye svekly]. Molodoy uchenyy. 2015. no 85, p. 67-69.
5. GOST 31494 – 2012. *Kvasy. Obshchie tekhnicheskie usloviya*. [Kvases. General Specifications]. Moscow, Publ. of Standartinform 2013, 6 p.

© Потапенко С. А., Иванников Д. В., Еременко О. Н., Кох Ж. А., 2023

УДК 661.18

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ\*

Е. Н. Ротар<sup>2</sup>, Е. И. Лесик<sup>2</sup>, М. А. Худoley<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
660041, Российская Федерация, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: wenia\_rotar@mail.ru

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке сорбционной ёмкости углеродных сорбентов, полученных из древесных отходов пиролизом в сочетании с химической обработкой.*

*Ключевые слова: углеродный сорбент, лиственная древесина, сорбционная ёмкость.*

## PREPARATION AND STUDY OF CARBON SORBENTS FROM VEGETABLE RAW MATERIALS

E. N. Rotar<sup>2</sup>, E. I. Lesik<sup>2</sup>, M. A. Khudoley<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
79 Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: wenia\_rotar@mail.ru

*The paper presents the results of experimental studies to assess the sorption capacity of carbon sorbents obtained from wood waste by pyrolysis combined with chemical treatment.*

*Keywords: carbon sorbent, hardwood, sorption capacity.*

В настоящее время основные области применения углеродных сорбентов связаны с техническими процессами адсорбции и очистки сточных вод различных производств. Углеродные сорбенты используются для извлечения из воды неполярных и малополярных соединений, таких как: галогенорганические соединения, фенол, ароматические углеводороды, диоксины и т.п. [1] Достоинством использования углеродных сорбентов является их способность к регенерации и биовозобновляемость ресурса. Для получения сорбентов, используют отходы древесно-перерабатывающей промышленности и сельскохозяйственных культур. К недостаткам можно отнести сравнительно не высокую сорбирующую способность (не более 15 кг/кг) и низкую скорость адсорбции.

Целью исследования являлось разработка технологии получения сорбентов из щепы лиственных пород. Образцы углеродных сорбентов из лиственной древесины получали методом пиролиза при температурах от 300 до 500 °С. В рамках исследования оценивалось влияние предварительной обработки исходного сырья на состав и выход продукта и сорбционную ёмкость образцов, полученных из

---

\* Исследования выполнены по государственному заданию Минобрнауки России по проекту «Разработка комплекса научно-технических решений в области создания биотоплив и оптимальных биотопливных композиций, обеспечивающих возможность трансформации потребляемых видов энергоносителей в соответствии с тенденциями энергоэффективности, снижения углеродного следа продукции и использования видов топлива альтернативных ископаемому» (Контракт FSRZ-2021-0012) в научной лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета, созданной в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь».

необработанного сырья и сырья, подвергнутого последовательно химической модификации поверхности водными растворами щелочей и кислот (NaOH и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Математический баланс процесса модификации исходного сырья показан на рис. 1.

Из полученных данных установлено, что при обработке древесины кислотой и щелочью удалялось до 22 масс % растворимых в воде спирто-фенольных соединений, камедей и пектинов. В результате в модифицированном сырье остаются преимущественно целлюлоза и гемицеллюлозы.

Метод термического разложения древесины использовался для получения углеродных сорбентов. Установлено, что увеличение температуры пиролиза снижает выход целевого продукта в среднем с 48 до 23%. Однако, увеличение температуры пиролиза с 300 до 400<sup>0</sup> привело к снижению выхода сорбента на 15%, а с 400 до 500<sup>0</sup> – лишь на 8 %. Полученные образцы оценивали по показателям сорбционной емкости по йоду, метиленовому голубому, кислоте и щелочи. Сорбционная ёмкость по йоду отражает содержание в адсорбенте микропор с размерами эффективных диаметров 0,6-1,5 нм [2], по метиленовому голубому – пор с размерами менее 1 нм [4]. Сорбционную ёмкость углеродного материала по кислоте и щелочи определяют, чтобы оценить насколько эффективно сорбент способен поглощать и удерживать такие типы загрязнений [3]. Показано, что обработка пиролизом позволяет увеличить сорбционную емкость по йоду в среднем в 2 раза (с 23 до 54 мг-экв/г для исходного и с 162 до 255 мг-экв/г для обработанного сырья), и минимум в 4 раза – сорбционную емкость по щелочи (с 23 до 95 мг-экв/г). Увеличение температуры пиролиза с 300 до 500 °С способствует повышению сорбции по йоду в среднем на 20 % на каждые 100 °С, однако приводит к значительному снижению активности по щелочи (с 420 до 46 мг-экв/г). Исследования эффективности использования полученных углеродных сорбентов для очистки воды от солей жесткости показало, что после пропускания через сорбент снизилось на 20 % содержание HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Массовая концентрация Ca<sup>2+</sup> снизилась в 2 раза и общая жесткость воды снизилась на 750,00 ммоль/дм<sup>3</sup>экв.



Рис. 1 – Материальный баланс модифицированного сырья

В табл. 1 показана оценка влияния сорбционной очистки на минерализацию пластовой воды на примере сорбента, полученного при температуре пиролиза 400<sup>0</sup>, модифицированное сырье, с активацией паром.

Таблица 1

**Оценка влияния сорбционной очистки на минерализацию пластовой воды**

Наименование показателя	Пластовая вода	Фильтрат
Плотность при 20 <sup>0</sup> , кг/м <sup>3</sup>	1 181	1 180
Водородный показатель pH	6,1	6,1
Массовая концентрация, мг/дм <sup>3</sup> :		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	73,20	57,95
Cl <sup>-</sup>	1 488 332,80	1 343 129,00
Ca <sup>2+</sup>	60 120,00	32 064,00
Общая жесткость, ммоль экв /дм <sup>3</sup>		
	4 250,00	3 500,00

Таким образом, в работе установлены зависимости влияния условий получения углеродных сорбентов пиролизом древесных отходов и технологии подготовки сырья на сорбирующую способность образцов, также показано снижение содержания солей жесткости в высокоминерализованной воде в среднем на 20%

### Библиографические ссылки

1. Промышленные сорбенты на основе натурального природного сырья [Электронный ресурс]. URL: <https://terra-ecology.ru/stati/promyshlennye-sorbenty-na-osnove-naturalnogo-prirodnogo-syrya/> (дата обращения: 10.03.2023).
2. Епифанцева Н. С., Симкин Ю. Я. Изменение химического состава древесины и свойств получаемых активных углей в зависимости от длительности сроков усыхания дерева // Современные проблемы науки и образования. 2008. № 4. С. 111–112.
3. Кокосовый активированный уголь (сорбция) [Электронный ресурс]. URL: <https://sebekpro.ru/katalog-resheniy/gotovye-resheniya/172-kokosovyj-aktivirovannyj-ugol-sorbtsiya.html> (дата обращения: 10.03.2023).
4. Лишай А. В., Савицкая Т. А., Цыганкова Н. Г., Гриншпан Д. Д., Джун Ч. Адсорбция метиленового голубого энтеросорбентами различной природы // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. 2021. С. 58–74.

### References

1. Industrial sorbents based on natural raw materials [Electronic resource]. URL: <https://terra-ecology.ru/stati/promyshlennye-sorbenty-na-osnove-naturalnogo-prirodnogo-syrya/> (date of reference: 10.03.2023).
2. Epifantseva N. S., Simkin Yu. Y. Changes in the chemical composition of wood and properties of the obtained active coals depending on the duration of wood desiccation // Modern problems of science and education. 2008. № 4. С. 111-112.
3. Coconut activated carbon (sorption) [Electronic resource]. URL: <https://sebekpro.ru/katalog-resheniy/gotovye-resheniya/172-kokosovyj-aktivirovannyj-ugol-sorbtsiya.html> (date of reference: 10.03.2023).
4. Lishay A. V., Savitskaya T. A., Tsygankova N. G., Grinshpan D. D., Jun Ch. Adsorption of methylene blue by enterosorbents of different nature // Journal of Belarusian State University. Chemistry. 2021. С. 58-74.

© Ротарь Е. Н., Лесик Е. И., Худолей М. А., 2023

УДК 676.024.6

## **ВЛИЯНИЕ ГАРНИТУРЫ С ОКРУЖНЫМИ НОЖАМИ НА БУМАГООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПРИ РАЗМОЛЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ЛИСТВЕННОЙ И ХВОЙНОЙ ПОРОД ДРЕВЕСИН**

С. А. Семилет, В. И. Яровая\*, Р. А. Марченко, Н. Г. Гранкин, С. В. Яровой

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Welta0007@mail.ru

*В данной статье представлены результаты исследований проведенных в лаборатории кафедры машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Исследовалось влияние ножевого способа размола с использованием гарнитуры с окружными ножами на бумагообразующие показатели при размоле различных типов исходного сырья.*

*Ключевые слова: бумагообразующие показатели, водоудерживающая способность, степень помола, длина волокна, время размола.*

## **INFLUENCE OF CURVILINEAR KNIFE SETTINGS ON PAPERMAKING PROPERTIES OF HARDWOOD AND SOFTWOOD PULP MILLING**

S. A. Semilet, V. I. Jarovaja\*, R. A. Marchenko, N. G. Grankin, S. V. Jarovoj

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Welta0007@mail.ru

*This article presents the results of research conducted in the laboratory of the Department of Machines and Devices of Industrial Technologies of Siberian State University named after. M.F. Reshetneva. The influence of the knife grinding method using a set with circumferential knives on paper-forming indicators when grinding various types of feedstock was studied.*

*Keywords: paper-forming indicators, water retention capacity, degree of grind, fiber length, grinding time.*

Свойства бумаги зависят от многих факторов, включая тип волокон и методы их обработки на всех этапах производства. Один из самых важных процессов в производстве бумаги – это процесс размола, который оказывает значительное влияние на свойства бумаги. [3].

В лаборатории кафедры "Машины и аппараты промышленных технологий" Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева была проведена серия экспериментов, чтобы изучить влияние размола на свойства бумаги. В ходе исследований были использованы два вида беленной сульфатной целлюлозы – лиственная и хвойная, которые являются полуфабрикатами от АО "Группа "Илим" в г. Братске. Начальный градус помола составлял 15 °ШР. Размол проводился в дисковой полупромышленной мельнице с использованием гарнитуры с окружными ножами. [1].

Для сравнения свойств хвойной и лиственной целлюлозы были выбраны следующие характеристики: время размола, длина волокна и водоудерживающая способность. Также были определены параметры процесса измельчения, включая частоту вращения ротора (2000 об/мин), зазор между диском ротора и статора (0,1 мм) и концентрацию массы волокна (1%, 2%, 3% для хвойной целлюлозы и 1%, 1,75%, 2,44% для лиственной целлюлозы).

В результате экспериментов были получены графики, которые наглядно показывают изменение основных свойств хвойной и лиственной целлюлозы в зависимости от степени помола. Полученные

данные показывают, что вид волокнистого полуфабриката существенно влияет на продолжительность размола. На основании этих данных была построена графическая зависимость прироста степени помола от времени размола волокнистого полуфабриката в зависимости от его вида.

На рис. 1 представлен график зависимости степени помола от времени размола.

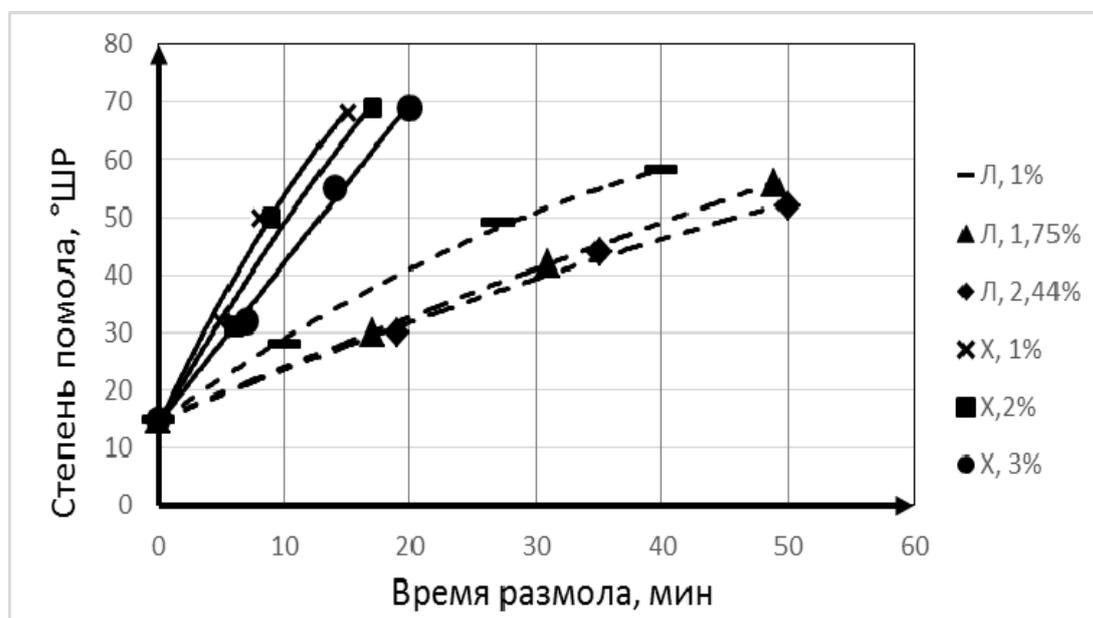


Рис. 1. Зависимость степени помола от времени размола: Л, 1% – лиственная целлюлоза с концентрацией 1%; Л, 1,75% – лиственная целлюлоза с концентрацией 1,75%; Л, 2,44% – лиственная целлюлоза с концентрацией 2,44%; Х, 1% – хвойная целлюлоза с концентрацией 1%; Х, 2% – хвойная целлюлоза с концентрацией 2%; Х, 3% – хвойная целлюлоза с концентрацией 3%

Например, для достижения степени помола, близкой к хвойной, требуется больше времени для размола лиственной целлюлозы. При концентрации массы 1% хвойной целлюлозы максимальное значение степени помола составляет 68 °ШР и достигается за 15 минут, в то время как для лиственной целлюлозы с концентрацией массы 1% максимальное значение составляет 58 °ШР и достигается за 40 минут размола. [5].

Зависимости средней длины волокна от степени помола °ШР показаны на рис. 2. Этот график показывает, что при увеличении степени измельчения длина волокна уменьшается. Это соответствует данным, представленным в специальной литературе [2]. Независимо от концентрации волокнистой суспензии и типа набора ножей, форма кривых имеет одинаковый качественный характер и представляет собой параболическую кривую. Значения изменения длины волокна лиственной целлюлозы немного отличаются от значений хвойной целлюлозы. Как известно, лиственная целлюлоза имеет более короткие волокна, чем хвойная. Анализируя графики на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод, что размол хвойной целлюлозы проходил быстрее из-за преобладания рубящего воздействия криволинейной гарнитуры на волокно, в то время как для массы из лиственной целлюлозы наблюдалось фибрилирующее воздействие [4].

Это объясняет схожие показатели длины волокна для разных масс.

Из графика, представленного на рисунке 3 видно, что наименьший показатель водоудерживающей способности наблюдается при использовании лиственной целлюлозы.

При увеличении концентрации массы от 1% до 3% происходит повышение водоудерживающей способности как для хвойной, так и для лиственной целлюлозы [5]. Увеличение водоудерживающей способности характеризуется увеличением поверхности волокна, что, в свою очередь, способствует лучшему контакту и соединению отдельных волокон в бумажный лист [4]. Но также это имеет и свои недостатки. Но также это имеет и свои минусы. Высокий показатель водоудерживающей способности говорит о том, что при отливе бумажного полотна обезвожить массу достаточно затруднительно, так как задерживается влага.

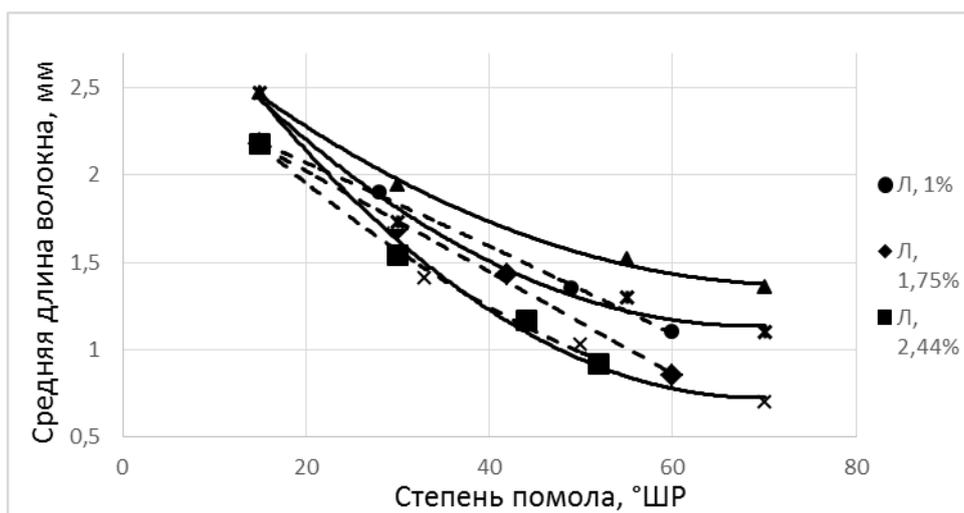


Рис. 2. Зависимость изменения длины волокна от степени помола: Л, 1% – листовная целлюлоза с концентрацией 1%; Л, 1,75% – листовная целлюлоза с концентрацией 1,75%; Л, 2,44% – листовная целлюлоза с концентрацией 2,44%; Х, 1% – хвойная целлюлоза с концентрацией 1%; Х, 2% – хвойная целлюлоза с концентрацией 2%; Х, 3% – хвойная целлюлоза с концентрацией 3%

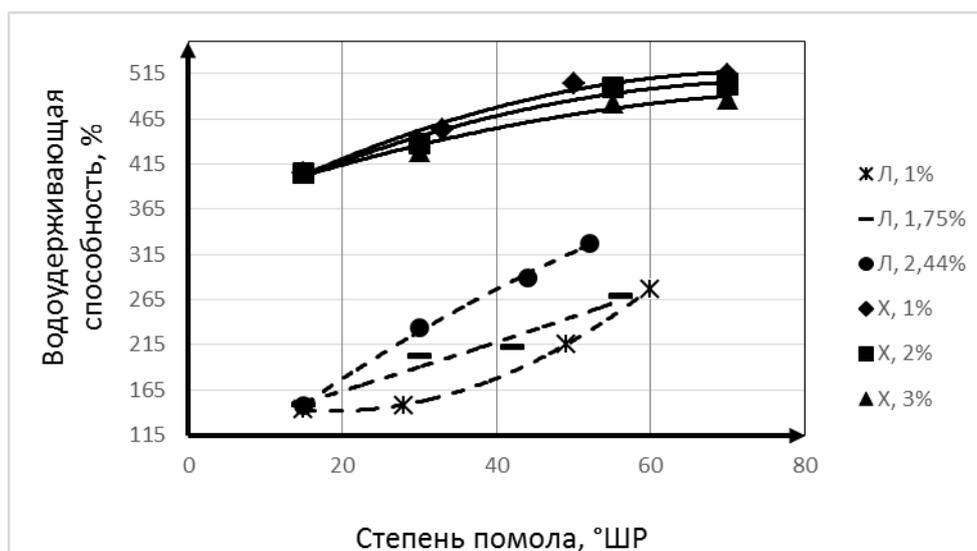


Рис. 3. Зависимость водоудерживающей способности от степени помола: Л, 1% – листовная целлюлоза с концентрацией 1%; Л, 1,75% – листовная целлюлоза с концентрацией 1,75%; Л, 2,44% – листовная целлюлоза с концентрацией 2,44%; Х, 1% – хвойная целлюлоза с концентрацией 1%; Х, 2% – хвойная целлюлоза с концентрацией 2%; Х, 3% – хвойная целлюлоза с концентрацией 3%

#### Выводы:

В результате теоретических и экспериментальных исследований на полупромышленной дисковой мельнице с использованием гарнитуры с криволинейной формой ножей получены зависимости влияния показателей процесса размола на основные бумагообразующие показатели разных видов сырья и тем самым был сделан сравнительный анализ, который показал:

1. Время размола для хвойной целлюлозы меньше на 60%, чем для листовной. Использование хвойной целлюлозы при размоле массы на гарнитуры с окружными ножами приведет к значительной экономии за счет сокращения энергозатрат на размол.

2. Качественные показатели массы из лиственной целлюлозы приближены, а в некоторых случаях и значительно лучше, чем для массы из хвойной целлюлозы. Это происходит за счет фибрилирующего воздействия на волокно.

### Библиографические ссылки

1. Алашкевич Ю.Д. Влияние рисунка гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов: Монография в 2-х частях. Часть 1 / Ю.Д. Алашкевич Ю.Д., Ковалев В. И., А.А. Набиева. Красноярск: СибГТУ, 2010. – 168 с.
2. Алашкевич Ю.Д. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов // Ю. Д. Алашкевич. – Красноярск, 2004. – 80с.
3. Легоцкий С.С., Гончаров В.Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 24 с.
4. Шуркина В.И., Марченко Р.А., Шумарина Н.Е. Исследование свойств волокнистой массы при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. всерос. науч.-практич. конф. – Красноярск: СибГАУ, 2020 – С.
5. Шуркина, В.И. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: дис...канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 30.06.16 / В.И. Шуркина – Красноярск, 2016. – 145 с.

### References

1. Alashkevich J.D. Influence of garnishing pattern on the process of grinding of fibrous semi- finished products: Monograph in 2 parts. Part 1 / Yu. D. Alashkevich, Kovalev V. I., Nabieva A.A. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010. – 168 с.
2. D. Alashkevich Yu.D. Hydrodynamic phenomena during knife-less processing of fibrous materials // Yu. – Krasnoyarsk, 2004. – 80с.
3. Legotsky S.S., Goncharov V.N. Milling equipment and preparation of paper pulp. – Moscow: Wood Industry, 1990. – 24 с.
4. Shurkina V.I., Marchenko R.A., Shumarina N.E. The study of the properties of the pulp when using a set with the curvilinear form of knives // Forest and Chemical Complexes – problems and solutions: coll. of All-Russian scientific and practical conference – Krasnoyarsk: SibSAU, 2020 – p.
5. Shurkina V.I. Perfection of knife milling of fibrous vegetable polymers in the pulp and paper industry: diss. of... candidate of technical sciences: 05.21.03: defended 30.06.16 / V.I. Shurkina – Krasnoyarsk, 2016. – 145 с.

© Семилет С. А., Яровая В. И., Марченко Р. А., Гранкин Н. Г., Яровой С. В., 2023

УДК 66.03

## ОБЗОР НАПОРНЫХ ЯЩИКОВ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. В. Сёмин, Ю. А. Амбросович

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ambrosovichja@sibsau.ru

*Рассматриваются проблемы напорных ящиков для напуска на бумаго- и картоноделательные машины. Сделан краткий обзор недостатков и пути их решения.*

*Ключевые слова: напускное устройство, напорный ящик, напор, потокораспределитель, целлюлоза.*

## OVERVIEW OF OPEN AND CLOSED HEADBOX IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

A. V. Semin, Y. A. Ambrosovich

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ambrosovichja@sibsau.ru

*The problems of headboxes for filling paper and cardboard machines are considered. A brief review of the shortcomings and ways to solve them is made.*

*Key words: inlet device, headbox, head, flow distributor, cellulose.*

Производство бумаги является достаточно сложным технологическим процессом на целлюлозно-бумажных комбинатах. Для получения той или иной продукции целлюлозы, бумаги и картона производство включает в себя ряд операций технологического процесса [1]. Анализ качества готовой продукции производится в лабораторных условиях и определяется в соответствии с требованиями государственного стандарта, одним из них структурно-размерные показатели (формат, вес  $1 \text{ м}^2$ , толщина, объемный вес и т. д.).

На структурно-размерные показатели бумажного полотна и на бесперебойную работу бумагоделательной машины для подачи волокнистой массы влияет напускное устройство (напорные ящики) [1].

Напорный ящик является одним из главных частей бумагоделательной и картоноделательной машин. Суть его существования заключается в распределении волокнистой суспензии по всей ширине сеточного стола машины. Скорость потока жидкости, как правило, меньше скорости сетки, таким образом, происходит ориентация волокон в потоке вдоль движения полотна.

Существуют ящики открытого и закрытого типов.

Они должны выполнять следующие задачи:

1 превращать узкий поток массы из трубопровода в широкий в соответствии с шириной буммашины и распределять его при напуске на сетку с одинаковыми расходом и скоростью;

2 передавать массу к выпускной щели без флокуляции и перекрестных струй с равномерной концентрацией на всех участках потока;

3 создавать определенную скорость выхода массы на сетку (согласно технологического регламента) при высокоинтенсивной турбулентности и малом ее масштабе.

Первая задача выполняется с помощью установки различных по конструкции потокораспределителей, из которых наибольшее распространение получили: гидродинамический горизонтальный, конический многотрубный и коллектор прямоугольного переменного сечения с перфорированной плитой.

Горизонтальный гидродинамический потокораспределитель, представленный на рис. 2, состоит из камеры, длина которой равна ширине бумагоделательной машины. Одной или двумя перегородками камера разделена на два клинообразных канала. Масса поступает в каналы сбоку и движется в противоположных направлениях.

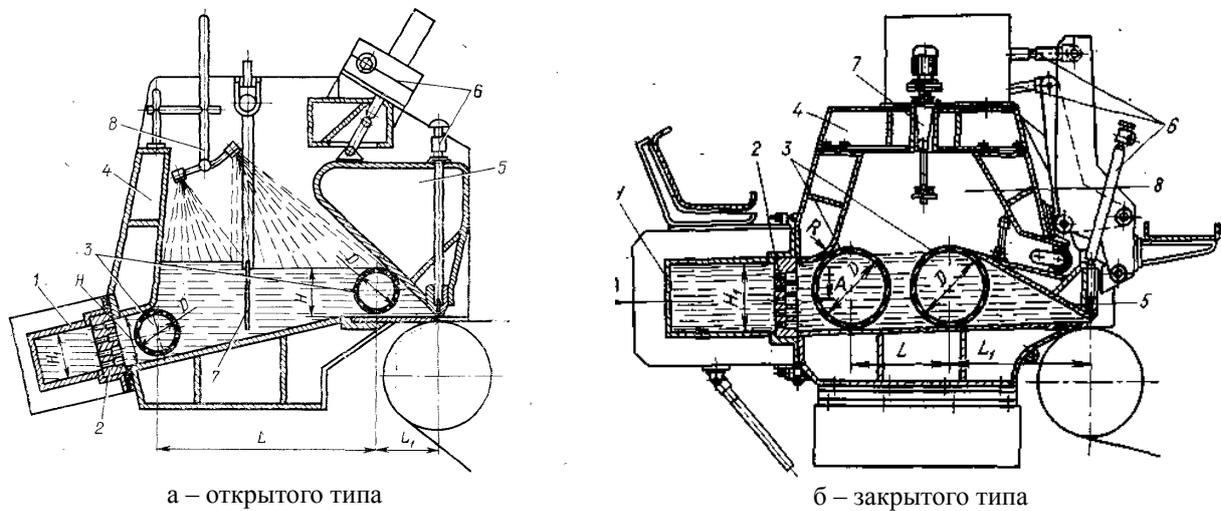


Рис. 1 Напорные ящики

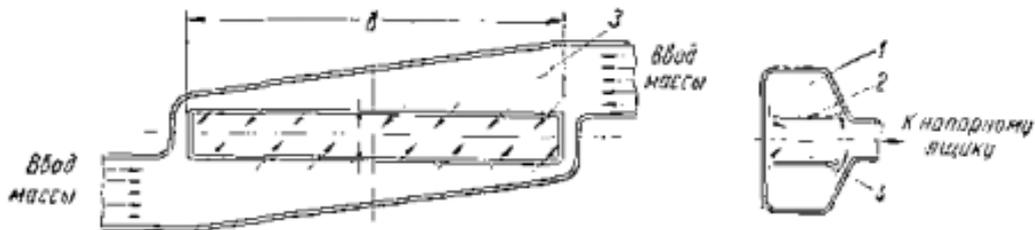


Рис. 2 Потокораспределитель горизонтального типа  
1 – камера; 2 – перегородки; 3 – клинообразный канал;  
4 – средняя часть камеры

Для выполнения второй задачи в напорных ящиках открытого и закрытого типов устанавливают дырчатые валики, которые изготавливаются диаметром от 200 до 500 мм из листовой кислотостойкой стали толщиной от 3 до 5 мм в зависимости от ширины машины и диаметра валика.

Напорный ящик открытого типа имеет существенные недостатки, к числу которых можно отнести наличие перекрестных струй в потоке массы, выходящем на сетку. Причиной появления перекрестных струй могут быть недостатки в работе потокораспределителя, неравномерной скорости поступления массы по ширине напорного ящика, неудачный выбор скорости вращения и площади живого сечения перфорированного валика установленного у выходной щели и другие дефекты конструкции ящика. Наличие указанных недостатков и небольшая скорость буммашин (до 400 м/мин) оснащенных ящиками открытого типа привели к ограничению использования напорных ящиков этого типа.

Напорные ящики закрытого типа не получили широкого применения из-за ряда недостатков: чувствительность к изменению в работе массового насоса, требуется предварительная деаэрация массы перед отливом, малая доступность очистки ящика [2].

Часто у напорных ящиков возникает проблема с верхней подвижной губой, которая выполняет функцию регулировки напускной массы, однако за свою подвижность она платит тем, что ее необходимо постоянно поддерживать в необходимом положении подтягивая болты. Чтобы решить эту проблему, можно заменить болты на пружины, которые будут удерживать ее в постоянном положении.

Вопрос с колебаниями подачи массы в напорный ящик можно решить, используя стабилизатор напруги, идущего к насосу, или поставить дополнительное оборудование, которое будет уравнивать давление массы перед поступлением в ящик [3, 4].

В заключение рассмотрения использования напорных ящиков для напуска на БДМ или КДМ можно предложить закрытые с воздушной подушкой. Закрытые напорные ящики с воздушной подушкой могут быть установлены как на сравнительно тихоходных, так и самых быстроходных бумагоделательных машинах. При работе на низких скоростях в воздушном пространстве вместо давления можно создавать разрежение с помощью вакуум-насоса и тогда общий напор массы будет ниже статического напора массы на величину разрежения в воздушном пространстве. Постоянство уровня массы в напорном ящике позволяет эффективно диспергировать волокнистую суспензию с помощью перфорированных валиков и непрерывно удалять путем перелива через перегородку скапливающуюся пену. Этот тип напорного ящика обеспечивает стабильность напора массы и отсутствие колебаний в широком диапазоне скоростей машины. Воздух, подаваемый в воздушное пространство, не смешивается с массой и потому не вызывает каких-либо затруднений при обезвоживании и формовании бумаги. При сравнительно небольшом объеме напорный ящик с воздушной подушкой легко доступен для осмотра и очистки и работа его внутренних механизмов хорошо контролируется. Благодаря этим достоинствам такие закрытые напорные ящики широко применяются в промышленности.

### Библиографические ссылки

1. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. В 2-х т. Том 1. Оборудование для производства волокнистых полуфабрикатов / В. А. Чичаев, А. А. Васильев, И. А. Васильев и др. – М.: Лесная пром-сть, 1981. 368 с.
2. Иванов С.Н. Технология изготовления бумаги. Издание третье, учебник / С.Н. Иванов – Московский государственный университет, 2006. 696 с.
3. Технологический регламент производства офисной и офсетной бумаги на БДМ № 15, технологический регламент. / АО «Монди СЛПК», 2015.
4. Александров А.В., Алашкевич Ю. Д. Оборудование ЦБП. Часть II. Бумагоделательные машины / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб. 2018. 96 с.

### References

1. Pulp and paper production equipment. In 2 vols. Volume 1. Equipment for the production of fibrous semi-finished products / V. A. Chichaev, A. A. Vasiliev, I. A. Vasiliev, etc. – M.: Lesnaya prom-st, 1981. 368 p.
2. Ivanov S.N. Technology of paper production. Third edition, textbook / S.N. Ivanov – Moscow State University, 2006. 696 p.
3. Technological regulations for the production of office and offset paper at BDM No. 15, technological regulations. / JSC "Mondi SLPC", 2015.
4. Alexandrov A.V., Alashkevich Yu. D. CBP equipment. Part II. Paper-making machines / SHTE SPbGUPTD. – St. Petersburg, 2018. 96 p.

© Сёмин А. В., Амбросович Ю. А., 2023

УДК 676.024.6

## АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБРАЗЦОВ ХИМИКО-ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МАССЫ

Д. А. Слепых, В. И. Яровая\*, Р. А. Марченко, М. О. Еремеев, С. В. Яровой

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Welta0007@mail.ru

*В статье проведен сравнительный анализ показателей образцов химико-термомеханической массы (ХТММ) после первой и второй ступеней размола, а так же после сушки массы.*

*Ключевые слова: химико-термомеханическая масса, фракционный состав, размол.*

## ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL INDICATORS OF CHEMICAL-THERMOMECHANICAL MASS SAMPLES

D. A. Slepых, V. I. Jarovaja\*, R. A. Marchenko, M. O. Eremeev, S. V. Jarovoj

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Welta0007@mail.ru

*The article provides a comparative analysis of samples of chemical-thermomechanical mass after the first and second stages of grinding, as well as after drying the mass.*

*Keywords: chemical-thermomechanical mass, fractional composition, grinding.*

Химико-термомеханическая масса (ХТММ) – это масса, получаемая совместным путем обработки щепы химическими реагентами и размола щепы в две ступени под давлением [1].

Производство ХТММ является перспективным направлением развития целлюлозно-бумажной промышленности. Производство ХТММ, как правило, интегрировано с бумажными фабриками и решает проблемы утилизации низкотоварной древесины и вторичного древесного сырья [2].

Лабораторные исследования проводились в Сибирском государственном университете науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва на кафедре Машины и аппараты промышленных технологий по заказу предприятия ООО «Термомеханика».

Проводился сравнительный анализ размолотой небелёной химико-термомеханической древесной массы из сосны после отжимного пресса и той же массы после температурной обработки (сушки).

Образец 1 – ХТММ после отжимного пресса, влажность массы 73,5%;

Образец 2 – ХТММ после сушки при температуре 110<sup>0</sup>, влажность массы 22,1%.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований ХТММ

Масса	Степень помола, °ШР	Длина волокна, мм	Водоудерживающая способность, %	Разрывная длина, м	Сопротивление продавливанию, кПа
Образец 1	35	1,69	249	2775	75
Образец 2	29	1,46	230	2121	59

Как видно из табл. 1, бумагообразующие и физикомеханические показатели ХТММ до сушки выше, чем после температурной обработки массы. Для древесных композитов после высушивания и по-

следующего увлажнения древесной массы прочность восстанавливается не полностью. Повышение температуры сушки снижает качественные показатели древесной массы. Особенно резко снижаются качественные характеристики при пересушки массы. Волокна такой массы становятся хрупкими и ломкими[3]. Необратимые изменения структуры и свойств волокон в результате их сушки связаны с так называемым ороговением волокон, характеризуемым уменьшением их внутренней поверхности, уплотнением, снижением гидрофильности и понижением доступности к проникновению реагентов. Чем выше конечная сухость готовой продукции после сушки, тем в большей степени проявляется ороговение. Оно усиливается от применения чередующихся циклов увлажнения и сушки. [4,5].

Мы предлагаем способы снизить явление ороговения волокон в результате их сушки:

- использовать более щадящий режим температурной обработки, не позволять массе пересушиваться;
- отделить из древесной массы мелкую фракцию;
- выдерживать высушенную массу в атмосфере влажного воздуха, тем самым можно несколько повысить ее сопротивление излому.

### Библиографические ссылки

1. Пузырёв С.С. Современная технология механической массы. В 2-х томах. С.-Петербургский гос. Техн. ун-т. Т.2, 1996, 235с. – Текст непосредственный.
2. Пузырев С.С., Виролайнэн Э.В. Технология целлюлозно – бумажного производства. В 3 т. Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч.3. Производство полуфабрикатов. – СПб.: Политехника, 2004. – 316 с. – Текст: непосредственный.
3. Киселева, О.А. Влияние режима сушки на свойства древесноволокнистых плит/ О.А. Киселева// Вестник науки и образования Северо-Запада России.2017. С. 1-5.
4. Фляте, Д.М. Технология бумаги. Учебник для вузов / Д.М. Фляте.– М. : Лесная промышленность, 1988. – 440 с. – Текст : непосредственный.
5. Ковернинский, И.Н. Исследование фракционного состава и механических свойств беленой химико-термомеханической массы и композиций с макулатурным волокном/ И.Н. Ковернинский, К.Д. Прокопенко, В.К. Дубовый, Н.А. Криницин, Г.А. Суслов //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2018. № 1. С. 81-84.

### References

1. Puzyrev S.S. Modern technology of mechanical mass. In 2 volumes. St. Petersburg State University. Tech. un-T. T.2, 1996, 235s. – The text is direct.
2. Puzyrev S.S., Virolainen E.V. Technology of pulp and paper production. In 3 T. T. I. Raw materials and production of semi-finished products. Part 3. Production of semi-finished products. – St. Petersburg: Polytechnic, 2004. – 316 p. – Text: direct.
3. Kiseleva, O.A. The influence of the drying regime on the properties of fiberboard / O.A. Kiseleva// Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia.2017. pp. 1-5.
4. Flate, D.M. Paper technology. Textbook for universities / D.M. Flate.– M. : Forest industry, 1988. – 440 p. – Text : direct.
5. Koverninsky, I.N. Investigation of the fractional composition and mechanical properties of bleached chemical-thermomechanical mass and compositions with waste paper fiber/ I.N. Koverninsky, K.D. Prokopenko, V.K. Dubovy, N.A. Krinitzin, G.A. Suslov //Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial technologies. 2018. No. 1. pp. 81-84.

© Слепых Д. А., Яровая В. И., Марченко Р. А., Еремеев М. О., Яровой С. В., 2023

УДК 662

## ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ФАУТНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Н. В. Смертин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: kolya.smertin@mail.ru

*В данной работе оценивается перспектива использования фаутной древесины при создании композиционных материалов.*

*Ключевые слова: древесина, грибы, пораженная, деструкция, композит.*

## THE USE OF WOOD AS A TREND TO REDUCE THE CARBON FOOTPRINT

N. V. Smertin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: kolya.smertin@mail.ru

*This work evaluates the prospects for using faucet wood in the creation of composite materials.*

*Keywords: wood, fungi, damaged, destruction, composite.*

На сегодняшний день комплексная переработка возобновляемого сырья является одной из наиболее сильно развивающейся отраслей промышленности. В частности, это касается древесины. Не смотря на сокращение количества заготавливаемого сырья Российскими ЛПК, общий объем древесины составляет 149 млн м<sup>3</sup> [1]. Помимо заготовки древесины известно также и число мертвой и фаутной древесины в российских лесах, составляющее примерно 20% от их общего значения [2]. Такое количество не заготавливаемой, а в последующем и не перерабатываемой древесины не только значительно сокращает потенциальную прибыль отраслевых предприятий, но также и неблагоприятно влияет на экологическую ситуацию.

Связанно это с удержанием углерода в такой древесины, количество которого составляет порядка 6 гигатонн [2].

В связи с этим, цель исследования можно сформулировать следующим образом: Оценка перспективы использования фаутной древесины при создании композиционных материалов.

Задачи исследования:

- 1) Определение видов фаутной древесины
- 2) Анализ способов утилизации такой древесины

Под фаутной древесиной подразумевается древесина, имеющая различные пороки (сучки, трещины и т. д.), а также древесина с яркими признаками процесса деструкции (повреждение насекомыми или грибами).

Древесина в процессе деструкции теряет свои прочностные свойства, ввиду чего в дальнейшем становится более хрупкой. Это связано с расщеплением основных компонентов в древесине (рис. 1).

Такое сырье является не пригодным в строительстве и декоре, в отличие от некоторых видов древесины с пороками. Однако, учитывая степень разрушения и химический состав, такая древесина, может являться пригодной для создания композиционных материалов, биопластиков, а также олигомерных продуктов [3],[4].

**Выводы:**

1) Наименее используемым видом фаутной древесины является древесина, подверженная процессу деструкции. Учитывая постоянный рост общего количества не используемой древесины, необходимо находить пути ее утилизации.

2) В результате деструкции, физикомеханические показатели древесины снижаются, однако гнилая древесина, ввиду своего химического состава, может быть использована для создания композиционных материалов, биопластиков и т. д.



Рис. 1. Гнилая древесины

**Библиографический список**

1. Леспром Информ [Электронный ресурс]. URL: <https://lesprominform.ru/news.html?id=19567#> (дата обращения: 15.09.2023).
2. Рослесинфорг [Электронный ресурс]. URL: [https://www.akm.ru/press/roslesinforг\\_vpervye\\_podschital\\_kolichestvo\\_mertvoy\\_drevesiny\\_v\\_rossiyskikh\\_lesakh/](https://www.akm.ru/press/roslesinforг_vpervye_podschital_kolichestvo_mertvoy_drevesiny_v_rossiyskikh_lesakh/) (дата обращения: 15.09.2023).
3. Грабакина О.А., Бабкин В.А., Медведева С.А., Иванова С.З. Деструкция грибом *Sporotrichium Pulverulentum* алкиларилэфирных димерных модельных соединений лигнина с карбонильной группой // Химия древесины, 1987. № 5. С. 34–40.

**References**

1. Lesprom Inform [Electronic resource]. URL: <https://lesprominform.ru/news.html?id=19567#> (access date: 09/15/2023).
2. Roslesinforг [Electronic resource]. URL: [https://www.akm.ru/press/roslesinforг\\_vpervye\\_podschital\\_kolichestvo\\_mertvoy\\_drevesiny\\_v\\_rossiyskikh\\_lesakh/](https://www.akm.ru/press/roslesinforг_vpervye_podschital_kolichestvo_mertvoy_drevesiny_v_rossiyskikh_lesakh/) (date of access: 09.15.2023).
3. Grabakina O.A., Babkin V.A., Medvedeva S.A., Ivanova S.Z. Destruction of alkylaryl ether dimeric model compounds of lignin with a carbonyl group by the fungus *Sporotrichium Pulverulentum* // Wood Chemistry, 1987. No. 5. pp. 34–40.

© Смертин Н. В., 2023

УДК 636.085.32:543.635.4

## ФОСФОЛИПИДЫ КОРМОВОГО ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ ЛИСТЬЕВ

А. О. Тихонова\*, Е. В. Исаева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: nastya00tix@mail.ru

*В работе представлены результаты определения состава фосфолипидов в кормовых продуктах, полученных после культивирования *Fomitopsis pinicola* и *Pleurotus pulmonarius* на растительных субстратах, состоящих из листьев древесных растений.*

*Ключевые слова: *Fomitopsis pinicola*, *Pleurotus pulmonarius*, липиды, хроматография, кормовой продукт.*

## PHOSPHOLIPIDS OF LEAF-BASED FEED PRODUCT

A. O. Tikhonova\*, E. V. Isaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: nastya00tix@mail.ru

*The paper presents the results of the composition of phospholipids in feed products obtained after cultivation of *Fomitopsis pinicola* and *Pleurotus pulmonarius* on plant substrates consisting of leaves of woody plants.*

*Keywords: *Fomitopsis pinicola*, *Pleurotus pulmonarius*, lipids, chromatography, feed product.*

Жиры являются важным компонентом кормов для животных, поскольку они обеспечивают энергию и помогают сохранить здоровье. Они также содержат необходимые витамины и жирные кислоты, которые помогают поддерживать иммунную систему и способствуют росту и развитию животных.

Среди всех питательных веществ жиры наиболее калорийны – 1 г жира после окисления дает организму в среднем 38 кДж энергии, тогда как углеводы – всего 17, а белки – 24 кДж [1]. Помимо этого, липиды являются структурными компонентами, прежде всего к ним относятся фосфолипиды, которые в сочетании с белками образуют липопротеиновые мембраны, регулирующие поступление различных веществ в клетку и ее органеллы.

В работе проводили исследование кормовых продуктов, полученных после культивирования штаммов Fp5-15 *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst и PP-3.2 *Pleurotus pulmonarius* на субстратах из зеленых и опавших листьев березы, осины и тополя на содержание липидов. Культивирование проводили в условиях, описанных в работе [2]. Липиды выделяли из исследуемых образцов по методике Блайя и Дайера и разделяли на группы с помощью колоночной хроматографии [3]. В качестве неподвижной фазы использовался силикагель L (100/250 меш.). Колонку последовательно промывали хлороформом, ацетоном и изопропиловым спиртом. В результате хроматографирования выделили группу фосфолипидов, содержащихся в изопропиловом элюате.

Установлено, что содержание липидов в кормовом продукте, полученном после культивирования *Fomitopsis pinicola* на зеленых и опавших листьях, составляет соответственно: в березе 4,2 и 4,7; осине 3,7 и 3,5; тополе 2,8 и 2,5 % от сухого сырья. На долю фосфолипидов приходится от 7 до 13 % от суммы липидов. В кормовом продукте на основе зеленых и опавших листьев, полученном после культивирования *Pleurotus pulmonarius*, содержание липидов составляет соответственно: в березе 1,5

и 2,6; осине 1,4 и 2,4; тополе 2,0 и 1,0 % от сухого сырья, а доля фосфолипидов колеблется от 3 до 9 % от суммы липидов.

Качественный состав фосфолипидов определяли с помощью тонкослойной хроматографии (ТСХ) на пластинах Silufol в системе растворителей: хлороформ-этанол (39:15); хлороформ-изопропанол-вода (65:35:3) [4, 5]. Проявляющий агент – пары йода. В качестве свидетеля использовали яичный лецитин.

Фосфолипиды определяли в следующих образцах: I – зеленые листья березы; II – зеленые листья осины; III – зеленые листья тополя; IV – зеленые листья березы после культивирования *P. pulmonarius*; V – зеленые листья осины после культивирования *P. pulmonarius*; VI – зеленые листья тополя после культивирования *P. pulmonarius*; VII – зеленые листья березы после культивирования *F. pinicola*; VIII – зеленые листья осины после культивирования *F. pinicola*; IX – зеленые листья тополя после культивирования *F. pinicola*. Хроматограммы представлены на рис. 1.

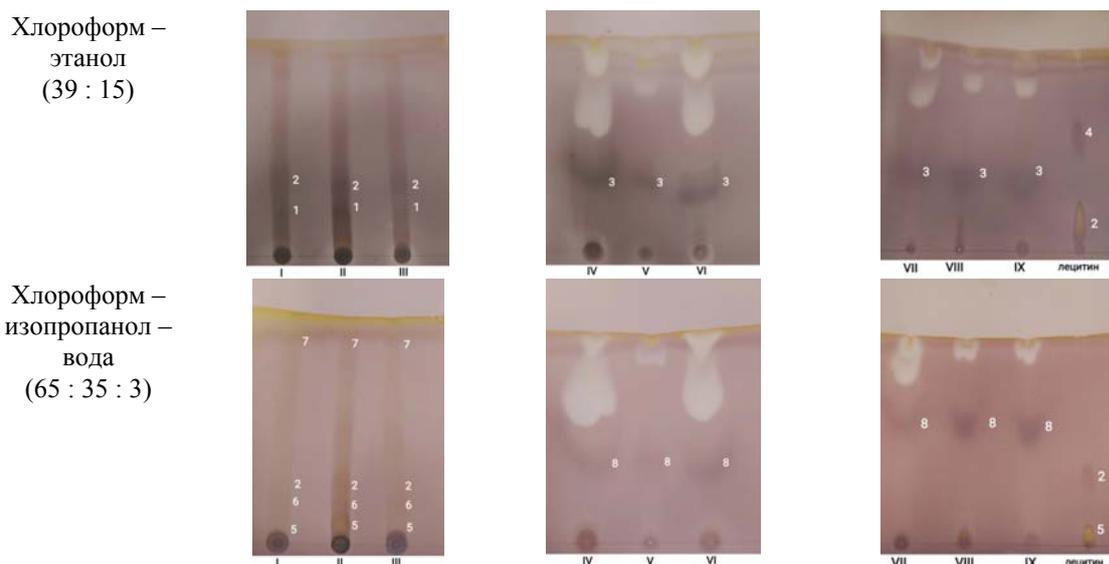


Рис. 1. Хроматограмма фосфолипидов листьев

Идентификацию соединений проводили по коэффициенту подвижности ( $R_f$ ) в сравнении с литературными данными (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты тонкослойной хроматографии фосфолипидов**

Номер пятна	Система: хлороформ – этанол (39 : 15)		Система хлороформ – изопропанол – вода (65 : 35 : 3)		Компонент [4, 5]
	$R_f$ образца	$R_f$ [4]	$R_f$ образца	$R_f$ [5]	
1	0,22	0,28	-	-	Не идентифицировано
2	0,07	0,07	0,32	0,33	Фосфатидилхолин
3	0,35	-	-	-	-
4	0,60	0,63	-	-	Не идентифицировано
5	-	-	0,07	0,06	Лизофосфатидилсерин
6	0,15	-	-	-	-
7	-	-	0,93	0,93	Не идентифицировано
8	-	-	0,54	0,51	Фосфатидилэтанолламин

Разделение фосфолипидов с помощью ТСХ показало наличие фосфатидилхолина и лизофосфатидилсерина в зеленых листьях березы, осины и тополя.

В образцах V-IX содержится фосфатидилэтанолламин. В организме человека и животного это вещество играет важную роль в метаболизме жиров и углеводов. Кроме того, он является одним из компонентов системы комплемента – иммунной системы организма, играет важную роль в активации

комплемента. Наличие данного вещества обогащает кормовой продукт, полученный на основе листьев исследованных древесных растений.

### Библиографический список

1. Значение жиров в кормлении животных [Электронный ресурс]. URL: [https://studbooks.net/1122885/agropromyshlennost/znachenie\\_zhirov\\_kormlenii\\_zhivotnyh](https://studbooks.net/1122885/agropromyshlennost/znachenie_zhirov_kormlenii_zhivotnyh) (дата обращения: 11.09.2023).
2. Утилизация вегетативной части тополя с использованием микробиологической конверсии / Е. В. Исаева, О. О. Мамаева, А. О. Тихонова и др. // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды : сб. материалов IX Всерос. конф., посвященной 55-летию Чувашского государственного ун-та им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары, 1-2 декабря 2022 г. ). – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. С. 17-18.
3. Кейтс, М. Техника липидологии. М. : Мир, 1975. 312 с.
4. Арчинова, Т. Ю., Манджиголадзе, Т. Ю. Изучение состава и анализ яичного лецитина химическими и физико-химическими методами // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 442-449.
5. Музалевская, О. В., Баранова М. А. Определение оптимальных параметров ТСХ-разделения липидов семян *Pinus silvestris* Ledeb // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2017. Т. 22. С. 3-11.

### References

1. The importance of fats in animal feeding. Available at: [https://studbooks.net/1122885/agropromyshlennost/znachenie\\_zhirov\\_kormlenii\\_zhivotnyh](https://studbooks.net/1122885/agropromyshlennost/znachenie_zhirov_kormlenii_zhivotnyh) (accessed 09.11.2023).
2. Isaeva E. V., Mamaeva O. O., Tikhonova A. O., Serbina L. M. [Utilization of the vegetative part of poplar using microbiological conversion]. *Materialy IX Vseros. konf. «Aktual'nyye voprosy khimicheskoy tekhnologii i zashchity okruzhayushchey sredy»* [Materials IX All-Russian «Current issues of chemical technology and environmental protection»]. Cheboksary, 2022, p. 17-18. (In Russ.)
3. Kates, M. *Tekhnika lipidologii* [Lipidology techniques] Moscow, Mir Publ., 1975. 312 p.
4. Archinova, T. Yu., Mandzhigoladze, T. Yu. *Izucheniye sostava i analiz yaichnogo letsitina khimicheskimi i fiziko-khimicheskimi metodami* [Study of the composition and analysis of egg lecithin by chemical and physical-chemical methods]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, no. 2, p. 442. (In Russ.)
5. Muzalevskaya, O. V., Baranova M. A. *Opredeleniye optimal'nykh parametrov TSKH-razdeleniya lipidov semyan Pinus silvestris Ledeb* [Determination of optimal parameters for TLC separation of lipids from *Pinus silvestris* Ledeb seeds]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017, t. 22, p. 3-11. (In Russ.)

© Тихонова А. О., Исаева Е. В., 2023

УДК 674.049

## АНАЛИЗ СВОЙСТВ КЛЕЕНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ШПОНА

А. Е. Тюменцева\*, А. Ю. Лопатин, В. Д. Эскин, А. И. Криворотова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: anastasiyatyumentsevaa@gmail.com

*В работе представлены результаты исследования свойств клееной фанерной продукции с использованием термомодифицированного шпона в различных комбинациях фанерного пакета.*

*Ключевые слова: клееные материалы, фанера, прочность, водостойкость, термомодифицирование, шпон, разбухание.*

## ANALYSIS OF PROPERTIES OF GLUED MATERIALS BASED ON THERMALLY MODIFIED VENEER

A. E. Tyumentseva\*, A. Y. Lopatin, V. D. Eskin, A. I. Krivorotova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: anastasiyatyumentsevaa@gmail.com

*The paper presents the results of a study of the properties of glued plywood products using thermally modified veneer in various combinations of plywood package.*

*Keywords: glued materials, plywood, strength, water resistance, thermal modification, veneer, swelling.*

Исторически сложилось, что древесина является практически обязательным материалом при строительстве домов и различных инженерных сооружений. Одним из востребованных строительных материалов на основе древесины на сегодняшний день является фанера – композит на основе лущеного шпона хвойных или лиственных пород древесины и клеевой композиции. Несмотря на множество положительных характеристик свойства и древесины и композитов на ее основе, в том числе и фанеры, под воздействием внешних факторов с течением времени достаточно быстро меняются. Сезонные перепады температуры, воздействие солнца, дождя, ветра и снега, плесени, грибов и прочих факторов приводят к потере внешнего вида, снижению прочности и влагостойкости. Пораженная древесина легче впитывает влагу, непредсказуемо изменяет линейные размеры при усушке и разбухании. Для нейтрализации таких воздействий древесине необходима дополнительная защита.

Термическая модификация является одним из способов экологически безопасной защиты древесины от факторов, ее разрушающих [1-3].

На кафедре технологии деревообработки СибГУ им. М.Ф. Решетнева смонтирована и испытана экспериментальная установка для термической модификации древесины на базе сушильного шкафа марки КВС G100/250. Термомодифицированию подвергался лущеный березовый шпон толщиной 2,0 мм [4].

Процесс термообработки проводился в соответствии с планом Бокса. В качестве выходных параметров были приняты прочность при статическом изгибе, прочность при скалывании, разбухание и водопоглощение.

Прессование образцов фанеры на основе термомодифицированного березового шпона производилось по стандартной методике [5].

Оценку влияния исследуемых факторов (режима термообработки) на прочность при статическом изгибе проводили по графической интерпретации уравнения регрессии и графикам эффектов факто-

ров и эффектов их взаимодействий. Полученные графические зависимости показывают наличие прямо пропорциональных зависимостей между продолжительностью и температурой термообработки и прочностью фанеры при статическом изгибе. С увеличением продолжительности термообработки прочность фанеры снижается более значительно по сравнению со снижением при повышении температуры термообработки. При этом увеличение продолжительности при максимальной температуре термообработки (200 °С) приводит к более значительному снижению прочности, чем при обработке при минимальной температуре [6].

Полученные образцы фанеры были также исследованы на показатель прочности при скалывании по клеевому слою, показатели водопоглощения и разбухания.

Таким образом, было установлено, что при использовании термомодифицированного шпона происходит снижение прочностных характеристик фанеры с одновременным повышением показателей водостойкости [7].

Проблему снижения прочностных показателей фанерной продукции было предложено решить путем использования термомодифицированного шпона только для наружных слоев фанерной продукции [8]. При проведении анализа полученных данных первоначально необходимо отметить менее интенсивный характер снижения значений показателей водопоглощения и разбухания фанеры после выдержки в воде в течение 24 ч. Минимальными значениями водопоглощения и разбухания обладают образцы с наружными слоями из шпона, обработанного при температуре 160 °С, 180 °С и 200 °С в течение 240 мин [9]. Для всех образцов с увеличением температуры и продолжительности выдержки наблюдается уменьшение водопоглощения и разбухания. Водопоглощение в зависимости от показателей термообработки снижается на величину от 0,4 до 7,6 %, разбухание на величину от 0,5 до 11 %. Характер изменения данных показателей несколько отличается от данных, полученных для термомодифицированной фанеры.

Максимальное снижение показателя водопоглощения образцов с наружными слоями из термомодифицированного шпона по сравнению с фанерой общего назначения составило 7,6 %, разбухания – 10,99 %.

Таким образом, фанера на основе термомодифицированного шпона приобретает более высокие показатели водостойкости, что позволяет значительно расширить сферу применения фанеры на основе карбамидоформальдегидных смол в строительных конструкциях и сооружениях.

### Библиографические ссылки

1. Сафин, Р. Р. Разработка новой технологии получения термодревеси / Р. Р. Сафин, Е. А. Белякова, Е. Ю. Разумов // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 1. – С. 148 – 157.
2. Владимирова, Е. Г. Технология производства заготовок из термически модифицированной древесины : Дис. канд. техн. наук. – Москва, 2012. – 178 с.
3. Хасаншин, Р. Р. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов, созданных на основе термически модифицированной древесины / Р. Р.
4. Хасаншин, Р. Р. Сафин, Ф. Г. Валиев, Р. В. Данилова // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 7 – С. 57 – 61.
5. Сафин, Р. Р. Исследование термомодифицирования древесины сосны в условиях вакуумно-кондуктивных аппаратов / Р. Р. Сафин, Р. Р. Хасаншин, Р. Р. Ахметова // Дизайн и производство мебели. – 2008. – № 2 – С. 29 – 31.
6. Сафин, Р. Р., Разумов, Е. Ю. Разработка технологий и оборудования термомодифицирования пиломатериалов : моногр. Йошкар-Ола : ПГТУ. – 2015. – 380 с.
7. Разумов, Е. Ю. Математическая модель процесса термомодифицирования древесины труднопропитываемых пород в жидкости / Е. Ю. Разумов, Е. А. Белякова, Р. Р. Сафин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 16 – С. 227 – 241.
8. Сафин, Р. Р. Разработка технологии и аппаратного оформления термомодифицирования древесины в жидкостях / Е. А. Белякова, Р. А. Халитов, Е. И. Байгильдеева // Вестник КГТУ. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 127–139.
9. Сафин, Р. Р. Разработка технологии создания влагостойкой фанеры / Р. Р. Сафин, Р. Р. Хасаншин, Р. Р. Зиатдинов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 20. – С. 64 – 65.

### References

1. Safin, R. R. Development of a new technology for obtaining thermal wood / R. R. Safin, E. A. Belyakova, E. Y. Razumov // Bulletin of Kazan Technological University. – 2011. – No. 1. – pp. 148 – 157.
2. Vladimirova, E. G. Technology of production of blanks from thermally modified wood : Dis. Candidate of Technical Sciences. – Moscow, 2012. – 178 p.
3. Khasanshin, R. R. Improving the performance characteristics of composite materials created on the basis of thermally modified wood / R. R.
4. Khasanshin, R. R. Safin, F. G. Valiev, R. V. Danilova // Bulletin of Kazan Technological University. – 2012. – Vol. 15. – No. 7 – pp. 57-61.
5. Safin, R. R. Investigation of thermomodification of pine wood in vacuum-conductive apparatus / R. R. Safin, R. R. Khasanshin, R. R. Akhmetova // Design and manufacture of furniture. – 2008. – No. 2 – pp. 29-31.
6. Safin, R. R., Razumov, E. Yu. Development of technologies and equipment for thermomodification of lumber : monogr. Yoshkar-Ola : PSTU.– 2015. – 380 p.
7. Razumov, E. Y. Mathematical model of the process of thermomodification of hard-to-feed wood in liquid / E. Y. Razumov, E. A. Belyakova, R. R. Safin // Bulletin of Kazan Technological University. – 2011. – No. 16 – pp. 227 – 241.
8. Safin, R. R. Development of technology and hardware design of thermomodification of wood in liquids / E. A. Belyakova, R. A. Khalitov, E. I. Baigildeeva // Bulletin of KSTU. – 2012. – Vol.15. – No. 3. – pp.127–139.
9. Safin, R. R. Development of technology for creating moisture-resistant plywood / R. R. Safin, R. R. Khasanshin, R. R. Ziatdinov [et al.] // Bulletin of Kazan Technological University. – 2012. –Vol.15. – No. 20. – pp. 64-65.

© Тюменцева А. Е., Лопатин А. Ю., Эскин В. Д., Криворотова А. И., 2023

УДК 676.16

## ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОДУКТА ОРГАНОСОЛЬВЕНТНЫМ СПОСОБОМ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ *PINUS SYLVESTRIS*<sup>1</sup>

В. С. Федоров\*, Т. В. Рязанова, О. О. Мамаева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: fedorovvladimir1996@yandex.ru

*В работе показана возможность использования древесных отходов для получения целлюлозного продукта экологически безопасным способом в среде уксусная кислота-пероксид водорода-вода.*

*Ключевые слова: сосна обыкновенная, древесина, древесные отходы, делигнификация, органосольвентная варка, целлюлоза.*

## PREPARATION OF CELLULOSE PRODUCT BY ORGANOSOLVENT METHOD FROM WOOD WASTE OF COMMON PINE *PINUS SYLVESTRIS*

V. S. Fedorov\*, T. V. Ryazanova, O. O. Mamaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: fedorovvladimir1996@yandex.ru

*The paper shows the possibility of using wood waste to produce a cellulose product in an environmentally friendly way in an environment of acetic acid-hydrogen peroxide-water.*

*Keywords: scots pine, wood, wood waste, delignification, organosolvent cooking, cellulose.*

Древесные отходы, образующиеся в результате механической обработки древесины, в полном объеме не используются, а находятся в отвалах. Такие отходы наносят вред окружающей среде, а в летний период являются пожароопасными. Количество отходов в виде опилок может составлять от 7 до 15 % от объема перерабатываемой древесины. Важным элементом ресурсосбережения является комплексное использование отходов деревоперерабатывающей промышленности [1]. Технологии переработки всех видов отходов основаны на механических, гидродинамических, термических, диффузионных, химических и биологических процессах [2].

Изучение компонентного состава позволяет определить способ переработки и направления использования продукта. Древесные отходы представлены в основном высокомолекулярными соединениями, такими как целлюлоза, пентозаны, гексозаны и лигнин.

Разрушение веществ лигниновой природы различными химическими реагентами позволяет получить качественный целлюлозный продукт. Выделение целлюлозы из растительного сырья называется процессом делигнификации [3]. Традиционные способы получения целлюлозы являются экологически не безопасными и требуют ряд дополнительных операций для получения качественного продукта [4-6].

В последние годы большой интерес представляет органосольвентный способ делигнификации, который является экологически безопасным способом, а также имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами [4-6].

---

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).

Целью исследования являлось изучение влияния процесса делигнификации с применением разных типов катализаторов на выход и содержания лигнина в целлюлозном продукте.

Объектом исследования являлись древесные отходы сосны обыкновенной *Pinus Sylvestris*. Опилки имеют различный фракционный состав, преобладающей является фракция с размером частиц  $d \leq 2$  мм и составляет 88,9 %. Изучение компонентного состава древесных опилок проводили согласно методикам принятых в химии древесины [7]. Химический состав опилок сосны следующий (% а.с.с.): экстрактивные вещества – 7,5; ЛПП – 16,2; ТПП – 38,7; лигнин – 25,8; минеральные вещества – 1,7. Высокое содержание трудногидролизуемых полисахаридов, позволяет рекомендовать данное сырье для получения целлюлозы. На процесс делигнификации влияет ряд факторов: концентрация реагентов, вид и тип катализатора, продолжительность, температура процесса и гидромодуль. Делигнификацию опилок проводили в среде «уксусная кислота – пероксид водорода – вода». Делигнифицирующий раствор, приготавливали перед применением или выдерживали в течение суток. Известно, что образование надуксусных кислот оказывает существенную роль при делигнификации [4, 5]. Установлено, что концентрация перекиси и перуксусной кислоты в свежеприготовленном растворе составляет 5,17 % и 0,72 % соответственно. В результате выдержки варочного раствора в течение суток происходят следующие изменения: содержание перекиси составляет 6,95 %, а перуксусной кислоты – 1,45 %. Увеличение концентрации перуксусной кислоты, свидетельствует о том, что в результате хранения происходит образование надуксусных кислот, которые также оказывают влияние на процесс удаления лигнина из растительного сырья. Процесс делигнификации проводили в две стадии. В качестве катализаторов применяли  $H_2SO_4$  и  $TiO_2$ . В полученном продукте определяли выход, содержание лигнина по методу Кенига в модификации Комарова и содержание редуцирующих веществ в гидролизате. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние катализатора на выход и качество целлюлозного продукта

Катализатор	Выход, % а.с.с.	Лигнин, % а.с.с.	Выход РВ в гидролизате, % а.с.с.
$H_2SO_4$	38,8/39,2	1,1/2,1	87,7/86,5
$TiO_2$	46,2/47,2	4,8/8,9	103,7/118,5

*Примечание:* числитель – свежий варочный раствор; знаменатель – выдержанный варочный раствор; а.с.с. – абсолютно сухое сырье; а.с.с. – абсолютно сухая целлюлоза

Полученные результаты показывают, что существенную роль на процесс делигнификации оказывает катализатор. Наименьшее содержание лигнина в продукте наблюдается в образцах, где в качестве катализатора использовалась  $H_2SO_4$ . При использовании серной кислоты выход целлюлозы ниже, так как кислота проявляет деструктурирующее действие на легкогидролизуемые полисахариды [5]. Использование в качестве катализатора концентрированной серной кислоты оказывает большую деструкцию лигнина, чем двуокись титана. При использовании двуокиси титана в качестве катализатора выход редуцирующих веществ составляет 103,7 %, что, по-видимому, связано с образованием дополнительных функциональных групп (альдегидных) в результате окислительной делигнификации. Результаты исследования показали, что выдержка варочного раствора на процесс делигнификации опилок сосны обыкновенной существенного влияния не оказывает.

Пероксидная целлюлоза, полученная при органосольвентной варке решает в первую очередь экологическую задачу, так как исключаются серосодержащие вещества из технологии. Полученную целлюлозу можно использовать для дальнейшей химической и биологической его обработки, которая широко применяется в химической, пищевой, фармацевтической, текстильной и других промышленности.

### Библиографические ссылки

1. Коробов В., Рушнов Н. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). Москва : Экология, 1991. 288 с.
2. Бобович, Б. Б. Переработка промышленных отходов. Учебник для вузов. Москва : «СП Интернет Инжинринг», 1999. 445 с.
3. Роговин, З. А. Химия целлюлозы. Москва : Химия, 1972. 520 с.

4. Получение целлюлозы окислительно-органосольвентным способом / А. В. Вураско, А. К. Жвирблите, А. Р. Галимова, Б. Н. Дрикер. – Екатеринбург, 2008. 24 с.
5. Пен, Р. З. Катализируемая делигнификация растительного сырья пероксидом водорода и пероксикислотами (обзор) / Р. З. Пен, Н. В. Каретникова, И. Л. Шапиро // Химия растительного сырья. – 2020. № 4. С. 331-349.
6. Пероксидная делигнификация вегетативной части топинамбура в среде уксусная кислота – вода / Т. В. Рязанова, В. С. Федоров, Е. В. Харьянова и др. // Химия растительного сырья. 2020. № 4. С. 351-358.
7. Химия древесины: учеб. пособие / Т. В. Рязанова, Н. А. Чупрова, Е. В. Исаева Сибирский государственный технологический университет. Красноярск : СибГТУ, 2012. 358 с.

### References

1. Korobov V., Rushnov N. *Pererabotka nizkokachestvennogo syr'yaproblemy (bezotkhodnoy tekhnologii)* [Switches are also included (without technology problems)]. Moscow: Ecology, 1991. 288 p.
2. Bobovich, B. B. *Pererabotka promyshlennykh otkhodov. Uchebnik dlya vuzov.* [Wet waste switches. Textbook for universities]. Moscow: "SP Internet Engineering", 1999. 445 P.
3. Rogovin, Z. A. *Khimiya tsellyulozy.* [Chemistry of cellulose]. Moscow: Chemistry, 1972. 520 p.
4. [The resulting cellulose-organic compound] / A. S. Vurasko, A. K. Zhvirblite, A. R. Galimova, B. N. Driker. – Yekaterinburg, 2008. 24 p.
5. Pen, R. Z [Catalyzed delignification of vegetative cheese of hydrogen peroxide and peroxic acids (herbs)] / R. Z Pen, N. S. Karetnikova I. L. Shapiro / *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* – 2020. no. 4. p. 331-349 (In Russ.).
6. Peroxide delignification vegetative mass of jerusalem artichoke in medium acetic acid-hoda / T. S. Ryazanova, V. S. Fedorov, Or. S. Haryanova et al. // *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* 2020. no. 4. p. 351-358 (In Russ.).
7. *Khimiya drevesiny: uchebnik. rukovodstvo* [Chemistry of wood: textbook. manual] / T. V. Ryazanova, N. A. Chuprova, E. V. Isaeva. Siberian National Technological University. Krasnoyarsk: SibSTU, 2012. 358 p.

© Федоров В. С., Рязанова Т. В., Мамаева О. О., 2023

УДК 676.15

## **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ПОКАЗАТЕЛИ БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ**

К. А. Хохлов \*, В. А. Кожухов, Ю. Д. Алашкевич, А. А. Карелина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: hkostya\_2001@mail.ru

*Влияние скорости вращения размалывающих органов – тема, изучаемая во многих научных работах. В данной статье исследуется влияние скорости вращения ротора лабораторной дисковой мельницы при размоле массы высокой концентрации из технической конопли.*

*Ключевые слова: волокнистая масса высокой концентрации, дисковая мельница, недревесное сырье, техническая конопля.*

## **THE INFLUENCE OF THE ROTATION SPEED OF THE DISK MILL ROTOR ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PAPER PRODUCTS**

K. A. Khokhlov \*, V. A. Kozhukhov, Y. D. Alashkevich, A. A. Karelina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: hkostya\_2001@mail.ru

*The effect of rotation speeds of grinding organs. This article examines the effect of influence of the rotor rotation speed of a laboratory disc mill when refining a high consistency mass of industrial hemp.*

*Keywords: high consistency pulp, mass refining, annuals plants, technical hemp.*

Во всем мире растет спрос на волокна однолетних растений из-за их возобновляемой и биоразлагаемой природы. В этой статье рассматриваются особенности волокон однолетних растений, которые делают их пригодными для использования в целлюлозно-бумажной промышленности. Возможность использования волокна однолетних растений, полученного с помощью механического способа, в производстве бумаги, так как этот способ быстрее и экологически безопаснее, хотя и даёт менее чистое волокно. [1].

К наиболее важным лубяным растениям относятся конопля, лен, кенаф, джут и рами. Коноплю и лен выращивают почти во всех странах и собирают как на зерно/семена, так и на волокно. Конопля (*Cannabis sativa*) является хорошим источником клетчатки и биомассы. Растения конопли имеют высоту от 1,5 до 2,5 м и средний диаметр стебля от 7 до 16 мм [2].

Конопля возникла в Центральной Азии и с тех пор выращивается на всех континентах, в регионах и странах. Волокна конопли уже давно используются для изготовления одежды, канатов и изоляционных материалов. В последнее время расширяется использование конопляного волокна в качестве армирующего материала в композиционных материалах, а также возрастает интерес к возобновлению производства бумаги из этого материала [3].

Размол является одной из важнейших технологических операций, предопределяющих свойства готовой продукции. Этот процесс наиболее энергоёмкий в бумажном производстве, на его осуществление расходуется до 60-70% энергии от общего потребления при изготовлении бумаги [3].

Перспективы процесса размола массы высокой концентрации с учетом факторов процесса размола, имеет следующие положительные моменты:

1. Повышение качества помола. С увеличением концентрации волокнистой массы качество помола становится выше. Это происходит потому что, при высокой концентрации в процессе размола в

между жерновами размаляются не отдельные волокна, а пучок волокон, соответственно при ударе ножей внутренние волокна в пучке разрушаются по слабым связям вдоль волокон, появляется процесс фибрилляции волокон. При увеличении качества помола повышаются физико-механические характеристики готовой продукции. [4].

В данном исследовании оценивается число оборотов ротора дисковой мельницы, разработанной на кафедре машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Она имеет возможность регулирования таких параметров как скорость вращения ротора, межножевой зазор, скорость подачи шнекового питателя.

Предподготовка сырья проводится путем измельчения лубяных волокон в молотковой дробилке и последующим их замачиванием.

Размол проводится при концентрации волокнистой массы 10%, скорости вращения ротора 2500 об/мин и 2000 об/мин и межножевом зазоре 1,5 мм.

На рис. 1 представлен график зависимости разрывной длины от степени помола.

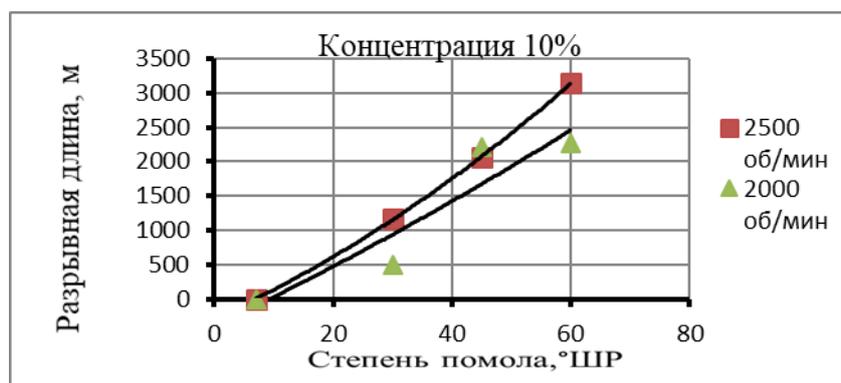


Рис. 1. График зависимости разрывной длины от степени помола

Для этого графика характерно повышение разрывной длины в начальный период размола, достижение максимума при 60 °ШР. Прочность бумаги на разрыв зависит не от прочности отдельных компонентов, а от прочности самой структуры бумаги, которая формируется в процессе бумажного производства. При 2000 об/мин наблюдается зависимость близкая к линейной, при 2500 об/мин зависимость параболическая.

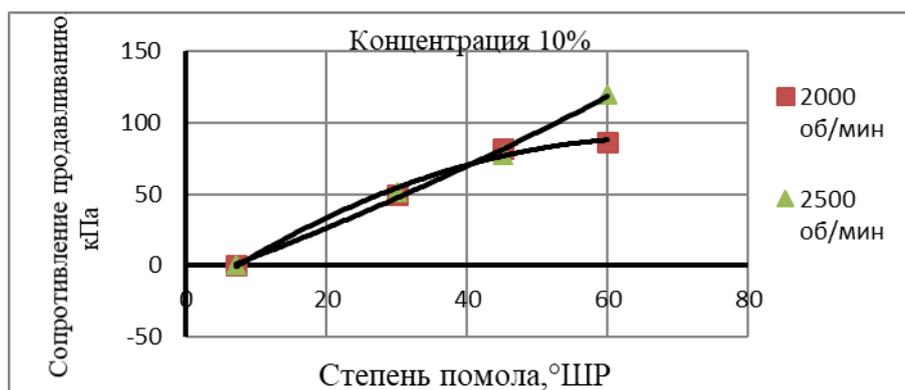


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления продавливанию от степени помола

На рисунке 2 представлены результаты показателя сопротивления продавливанию. Сопротивление продавливанию, как известно, является сложной функцией сопротивления разрыву и удлинению и зависит в первую очередь от длины волокон и сил связи между ними.

В отличие от рисунка 1 при скорости 2500 об/мин наблюдается близкая к линейной зависимость, а при скорости 2000 об/мин наблюдается параболическая зависимость.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1) В силу того, что межволоковой зазор при размоле массы высокой концентрации 1,5 мм существенно больше, чем при низкой, эффективное давление, действующее на волокна, снижается. Это приводит к уменьшению вероятности измельчения волокна, усиливает фибриллирующее действие, обусловленное работой межволоконного трения. Количество циклов воздействия на волокна резко возрастает по сравнению с размолем массы низкой концентрации [5].

2) Все исследуемые физико-механические показатели при размоле волокон однолетних растений (разрывная длина, сопротивление продавливанию) растут с увеличением степени помола. Наблюдается некоторое их отличие, в частности разрывная длина при скорости 2000 об/мин наблюдается зависимость близкая к линейной, при 2500 об/мин параболическая. Сопротивления продавливанию при скорости 2000 об/мин наблюдается параболическая зависимость, при скорости 2500 об/мин имеет места линейная зависимость. Как выяснилось наилучшие результаты при размоле массы высокой концентрации наблюдается при скорости вращения ротора 2000 об/мин нежели 2500 об/мин.

### Библиографические ссылки

1. Вахид Садрманеш и Ин Чен (2018): Лубяные волокна: структура, обработка, свойства и применение, *International Materials Reviews*, DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171
2. Ричардсон М.О., Мадера-Сантана Т.Дж., Гаага Дж. Композиты из натуральных волокон – потенциал азиатских рынков. *Prog Rubber, Plast Recycl Technol.* 1998; 14: 174–188.
3. Шахзад А. Конопляное волокно и его композиты – обзор. *J Compos Mater.* 2012; 46: 973–986.
4. Размол волокнистых материалов высокой концентрации в дисковой мельнице / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, Р. А. Марченко // *Хвойные бореальной зоны.* – 2019. – Т. 37, № 6. – С. 471-474. – EDN XBVIII.
5. Ушаков Александр Васильевич, Алашкевич Юрий Давыдович, Кожухов Виктор Анатольевич, Ковалев Валерий Иванович **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ (ОБЗОР)** // *Химия растительного сырья.* 2020. №4.

### References

1. Vahid Sadrmanesh and Ying Chen (2018): Bast fibers: Structure, processing, properties and application, *International Materials Reviews*, DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171
2. Richardson M.O., Madera-Santana T.J., The Hague J. Composites made of natural fibers – the potential of Asian markets. *Prog Rubber, Plast Recycl Technol.* 1998; 14: 174–188.
3. Shahzad A. Hemp fiber and its composites – review. *J Compos Mater.* 2012; 46: 973–986..
4. Grinding of fibrous materials of high concentration in a disc mill / A.V. Ushakov, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov, R. A. Marchenko // *Coniferous boreal zones.* – 2019. – Vol. 37, No. 6. – pp. 471-474. – EDN XBVIII.
5. Ushakov Alexander Vasilyevich, Alashkevich Yuri Davydovich, Kozhukhov Viktor Anatolyevich, Kovalev Valery Ivanovich **THE CURRENT STATE AND PROSPECTS OF IMPROVING THE PROCESS OF GRINDING FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS OF HIGH CONCENTRATION (REVIEW)** // *Chemistry of vegetable raw materials.* 2020. №4.

© Хохлов К. А., Кожухов В. А., Алашкевич Ю. Д., Карелина А. А., 2023

УДК 66.015.23

## ВЛИЯНИЕ ПАРЦИАЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ СКИПИДАРА\*

В. А. Чернов, Д. А. Земцов\*, Н. В. Дерягина, Н. А. Войнов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: denis\_zemtsov.92@mail.ru

*Показано, что при парциальной конденсации происходит разделение компонентов смеси на фракции, отличные от адиабатной перегонки, что позволяет снизить количество общей серы в дистилляте и повысить выход продукта.*

*Ключевые слова: термическая ректификация, парциальная конденсация, скипидар сульфатный, вакуум, дистиллят, сера.*

## INFLUENCE OF PARCIAL CONDENSATION FOR TURPENTINE RECTIFICATION

V. A. Chernov, D. A. Zemtsov\*, N. V. Deryagina, N. A. Voinov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: denis\_zemtsov.92@mail.ru

*The influence of partial condensation in separation of purified sulfate turpentine has been studied. It is shown that partial condensation separates mixture components by fractions different to adiabatic distillation, which reduces the total sulfur in the distillate and increases the product yield.*

*Keywords: thermal distillation, partial condensation, sulfate turpentine, vacuum, distillate, sulfur.*

Сульфатный скипидар является побочным продуктом при производстве сульфатной целлюлозы. Он выделяется в ходе варки щепы из варочного котла целлюлозного производства [1].

Вследствие резкого неприятного запаха, связанного с присутствием соединений серы, он не находит квалифицированного применения и нуждается в очистке. В настоящее время ставится задача добиться такой степени очистки от серосодержащих соединений, которая позволила бы повысить качество сульфатного скипидара до сопоставимого с живичным [2].

В связи с импортозамещением в последнее время возрос спрос на отечественный сульфатный скипидар. В России и СНГ сульфатный скипидар производят несколько предприятий целлюлозно-бумажной промышленности с суммарным выходом продукта около 6000 т/г [3].

Основными потребителями сульфатного скипидара-сырца являются три предприятия, производящие живичный скипидар: ОАО «Оргсинтез» (Нижегородская область), ОАО «Уральский лесохимический завод» (Свердловская область), ОАО «Сибирский лесохимический завод» (СЛХЗ) (Красноярский край). Эти предприятия перерабатывают сырец в очищенный скипидар, реализуя его в чистом виде или используя в собственном производстве различной продукции на основе скипидара. Основные потребители их продукции это лакокрасочная промышленность и металлургия. Так же очищенный скипидар экспортируется в Китай и Индию.

В настоящее время очистку сульфатного скипидара производят методом ректификации в насадочных колоннах [4, 5], что позволяет снизить содержание общей серы до значений 0.005 %. При этом

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).

выход продукта от общего объема сырья составляет около 40 %. Головную и хвостовую фракцию используют для получения флотомасла, где содержание серы не регламентируется.

Целью работы является исследование влияния парциальной конденсации при ректификации сульфатного скипидара очищенного для увеличения выхода продукта с высокой добавленной стоимостью.

В экспериментах использовался скипидар сульфатный очищенный предоставленный ОАО «СЛХЗ» (СТО 80241670-019-2017) с содержанием сернистых соединений в пересчете на серу 180-210 ppm (0,018-0,021 %).

Для определения содержания серы использовали рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный прибор MiniPAL-Sulfur (PANalytical, Нидерланды).

После простой перегонки под вакуумом 85% была получена фракция легкокипящего  $\alpha$ -пинена с массовой долей общей серы 0,007 %. Данный результат был улучшен при осуществлении парциальной ректификации под вакуумом (остаточное давление 3-4 кПа) в разработанной нами ректификационной установке (рис. 1).

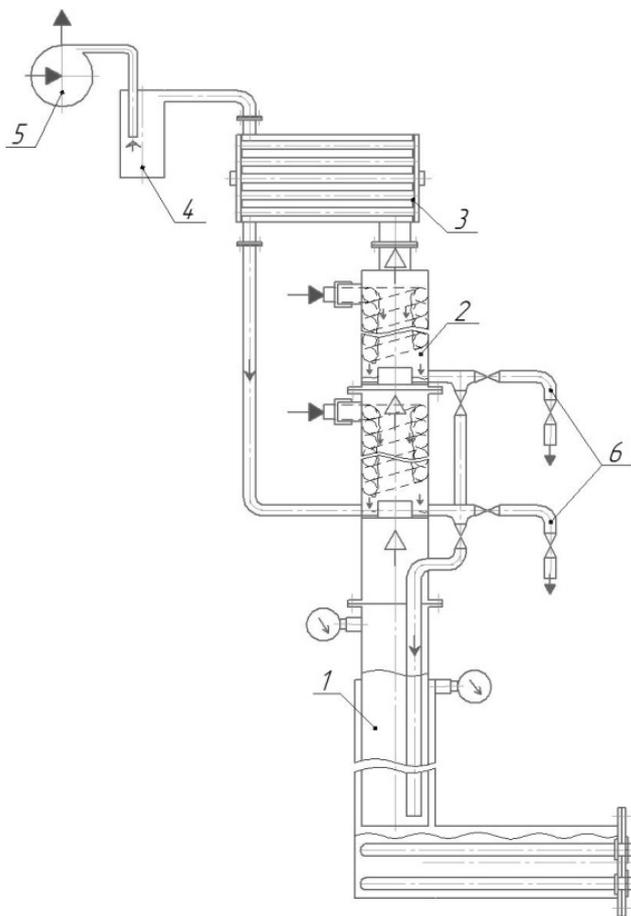


Рисунок 1 – Установка парциальной ректификации скипидара

1 – куб; 2 – колонна; 3 – конденсатор; 4 – сепаратор; 5 – вакуум-насос; 6 – система отбора  
 → – теплоноситель; ⇨ – пары скипидара; → – конденсат; – воздух

Установка выполнена из куба с рубашкой с рабочим объемом 2 литра. В рубашке устанавливались два электронагревателя общей мощностью 10 кВт для получения водяного насыщенного пара под давлением 0,3-0,5 МПа. На крышке куба была установлена разделительная колонна, состоящая из 2 царг высотой по 0,5 м в полости которых по высоте размещались два теплообменника выполненные в виде змеевика из медных трубок. А также установлены устройства для отвода конденсата на разных уровнях. Установка снабжена технологическими штуцерами и пробоотборниками, позволяющими вести отбор проб при наличии вакуума в системе. В верхней части колонны устанавливался конденсатор и сепаратор отделитель, который соединялся трубопроводом с водокольцевым вакуум насосом ВВН 400.

Парциальная ректификация осуществлялась путем частичной конденсации поднимающихся паров скипидара из куба на поверхности теплообменников. Оставшиеся пары конденсировались в конденсаторе.

Результаты проведенных исследований показали, что применение парциальной ректификации паров скипидара под вакуумом обеспечивает разделение смеси на определенные фракции и приводит к доочистке альфа-пинена от сернистых соединений.

#### Библиографические ссылки

1. Ильичев, И. С. Глубокая очистка скипидара от сернистых соединений / И. С. Ильичев, А. Б. Радбиль, А. А. Шалашова, Е. А. Маврина, И. А. Козлов, А. В. Игнатов, Л. Л. Семенычева // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2014. – № 1 (1). – С.110–114.
2. Козлов А.И. Очистка сульфатного скипидара от сероорганических соединений / А. И. Козлов, А. В. Беспалов, В. Н. Грунский, И. А. Козлов, А. С. Новоселов, Т. И. Долинский // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. 23. – № 2 (95). – С. 71–74.
3. Производство скипидара в России [Электронный ресурс]. URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/9619/.html> (дата обращения: 01.08.2023).
4. Пат. 259972 ПНР. Способ переработки сульфатного скипидара. / Kazimirchak F. Оpubл. 04.02.88. // Реферативный журнал химия. 1988. Вып. 62. № 12.
5. Рудаков, Г. А. Химия и технология камфары. / Г. А. Рудаков. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 208 с.

#### References

1. Il'ichev, I. S. Glubokaya ochistka skipidara ot sernistykh soedineniy / I. S. Il'ichev, A. B. Radbil', A. A. Shalashova, E. A. Mavrina, I. A. Kozlov, A. V. Ignatov, L. L. Semenycheva // Vestn. Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo. – 2014. – № 1 (1). – S.110–114.
2. Kozlov A.I. Ochistka sul'fatnogo skipidara ot seroorganicheskikh soedineniy / A. I. Kozlov, A. V. Bespalov, V. N. Grunskiy, I. A. Kozlov, A. S. Novoselov, T. I. Dolinskiy // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. – 2009. – T. 23. – № 2 (95). – S. 71–74.
3. Turpentine production in Russia. Available at URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/9619/.html> (accessed 01.08.2023).
4. Pat. 259972 PNR. Sposob pererabotki sul'fatnogo skipidara. / Kazimirchak F. Opubl. 04.02.88. // Referativnyy zhurnal khimiya. 1988. Vyp. 62. № 12.
5. Rudakov, G. A. Khimiya i tekhnologiya kamfary. / G. A. Rudakov. – M.: Lesnaya promyshlennost', 1976. – 208 s.

© Чернов В. А., Земцов Д. А., Дерягина Н. В., Войнов Н. А., 2023

УДК 674.8

## СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ И ТОКСИЧНОСТИ ДВП ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРЫ В ДЕРЕВОВОЛОКНИСТОЙ КОМПОЗИЦИИ\*

А. А. Шотов<sup>\*1</sup>, В. Н. Матыгулина<sup>1</sup>, Н. Г. Чистова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

<sup>2</sup> Красноярский институт железнодорожного транспорта,  
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения  
Российская федерация, 660028 г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2и

\*E-mail: shotov.a@inbox.ru

*Исследования в области использования новых видов связующих в производстве плитных материалов направлены на уменьшение себестоимости упрочняющих добавок и снижение эмиссии вредных веществ, выделяемых в процессе производства и эксплуатации плит.*

*Ключевые слова: кора, фольмальдегидные смолы, древесноволокнистые плиты, утилизация.*

## EDUCING THE COST AND TOXICITY OF FIBERBOARD DUE TO THE USE OF BARK IN THE WOOD FIBER COMPOSITION

A. A. Shotov<sup>\*1</sup>, V. N. Matygulina<sup>1</sup>, N. G. Chistova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, branch of the Irkutsk State Transport University  
2i, Novaya Zarya str., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation

\*E-mail: shotov.a@inbox.ru

*Research in the field of using new types of binders in the production of board materials is aimed at reducing the cost of strengthening additives and reducing the emission of harmful substances released during the production and operation of boards.*

*Keywords: bark, formaldehyde resins, fiberboards, recycling.*

Процесс утилизации древесной коры, неизбежно образующейся при заготовке и переработке древесины, является наиболее слабым звеном в системе комплексного использования древесного сырья на предприятии. Кора относится к отходам производства и не находит широкого промышленного использования по причине особого анатомического строения, высокой влажности и повышенной зольности. Ежегодно в мире на крупных деревообрабатывающих предприятиях накапливается около 360 млн. м<sup>3</sup> коры или более 250 млн. тонн. Небольшая часть коры используется для производства топливных брикетов, сжигается, но значительная часть выводится на полигоны с целью захоронения.

В настоящее время проводятся многочисленные исследования, у отечественных и зарубежных авторов существует множество разработок в этом направлении [1, 2].

Но, несмотря на это, кора не находит достаточно применения. Как было указано ранее, это связано со свойствами древесной коры, и с тем что, например, использование коры свыше 15% от массы а.с.в. при производстве древесноволокнистых плит, ухудшает прочностные характеристики плит: снижается прочность на изгиб, ухудшаются их гидрофобные свойства.

В качестве связующих при производстве древесноволокнистых плит используется фенолоформальдегидные и карбамидоформальдегидные смолы, увеличивающие себестоимость и эмиссию вредных веществ, как в процессе производства, так и при дальнейшей эксплуатации изделия.

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).

Анализ результатов исследований и патентной информации позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время ведутся разработки в двух направлениях. Во-первых, это модификация существующих смол, а во-вторых – разработка новых связующих, не содержащих формальдегид.

Исследования в области модификации и использования новых связующих в производстве плитных материалов направлены на уменьшение их себестоимости и снижение эмиссии вредных веществ при сохранении физико-механических показателей готовой продукции.

В научной лаборатории «Глубокая переработка растительного сырья» СибГУ имени М.Ф. Решетнева проводятся исследования возможного использования коры сосновой, березовой и елово-пихтовой в производстве древесноволокнистых плит мокрого способа производства. В качестве сырья использовалась технологическая щепка из неокорённой древесины хвойных и лиственных пород. В соответствии с принятым технологическим режимом производства ДВП получали древесноволокнистую массу, размалывая ее в две ступени, на дефибраторе и рафинаторе. В полученную древесноволокнистую массу добавляли фенолоформальдегидную смолу в количестве 1 % от массы а.с.в., парафиновую эмульсию в количестве 1 % парафина к массе а.с.в. в качестве осадителя использовалась серная кислота.

Перед введением в древесноволокнистую композицию кора разных пород древесины измельчалась до размеров от 0,05 до 0,8 мм. Для измельчения использовали мельницу, работающую по сухому способу размола, рабочим органом которой является ротор с закрепленными на нем ножами. В боковой стенке корпуса установлена специальная сетка, контролирующая время измельчения и фракционный состав коры. Далее измельченная кора замачивалась в течение 2 часов в воде при температуре 60 °С. Количество коры, вводимое в древесноволокнистую массу, являлось входным параметром и варьировалось в интервале от 2 до 14% от массы исходного древесноволокнистого полуфабриката. Отлив ковра и прессование плит производилось на лабораторном оборудовании.

В качестве выходного параметра эксперимента, определяющего качество ДВП согласно ГОСТа 4598-86 «Плиты древесноволокнистые мокрого способа производства» был принят предел прочности при статическом изгибе. В результате было получено статистическо-математическое описание, отражающее влияние процентного содержания сосновой, елово-пихтовой и берёзовой коры на предел прочности плит при статическом изгибе

$$Pr^{сосна} = 20,19 - 0,23C_1^2 + 4,5C_1, \quad (1)$$

$$Pr^{ель-пихта} = 19,15 - 0,22C_2^2 + 4,03C_2, \quad (2)$$

$$Pr^{береза} = 22,79 - 0,07C_3^2 + 1,06C_3. \quad (3)$$

где  $Pr$  – предел прочности плит при статическом изгибе, МПа;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – содержание соответственно коры сосновой, коры елово-пихтовой, коры берёзовой, %.

Ниже приведена графическая зависимость результатов исследования (рисунок 1).

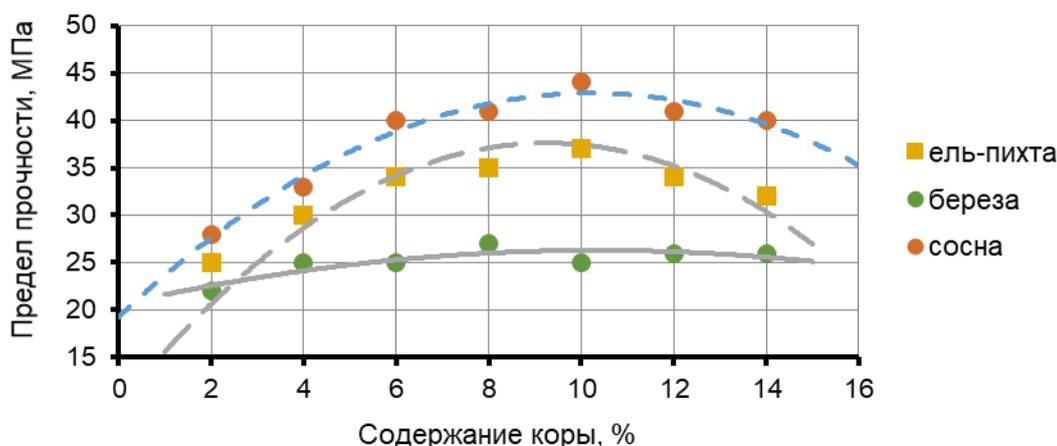


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности при статическом изгибе ДВП от процентного содержания коры

Исследования показали, что наибольшее влияние на значение прочности плит оказывает содержание сосновой и елово-пихтовой коры, содержание березовой коры в древесноволокнистой плите незначительно влияет на данный показатель.

С увеличением содержания коры до 10 % прочностные показатели плит улучшаются, а свыше 12% предел прочности при статическом изгибе несколько снижается. Это можно объяснить тем, что кора, измельченная до определенного фракционного состава, замоченная в горячей воде и выдержанная в течение определенного времени, обеспечивает образование дополнительных адгезионных связей. Плотность полученных образцов изменялась в интервале от 930 кг/м<sup>3</sup> до 1015 кг/м<sup>3</sup>, но закономерности влияния коры на плотность не было установлено.

Введение в состав древесноволокнистой массы коры с определенными морфологическими свойствами позволит снизить расход фенолоформальдегидного связующего при производстве плит мокрым способом из древесины хвойных и лиственных пород.

#### Библиографические ссылки

1. Лазарева, Л. И. Использование коры при получении древесно-волоконистых плит / Л. И. Лазарева, Н. Г. Чистова, С. О. Медведев // Химия растительного сырья. – 2013. – № 1. – С. 235-238.
2. Состояние и перспективы использования древесной коры / З. Пастори, Г. А. Горбачева, В. Г. Санаев [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24, № 5. – С. 74-88. – DOI 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88.

#### References

1. Lazareva, L. I. The use of bark in the production of wood-fiber boards / L. I. Lazareva, N. G. Chistova, S. O. Medvedev // Chemistry of plant raw materials. – 2013. – No. 1. – pp. 235-238.
2. The state and prospects of using tree bark / Z. Pastory, G. A. Gorbacheva, V. G. Sanaev [et al.] // Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin. – 2020. – Vol. 24, No. 5. – pp. 74-88. – DOI 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88.

© Шотов А. А., Матыгулина В. Н., Чистова Н. Г., 2023

УДК 674.816.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНО-КОРЬЕВЫХ КОМПОЗИТОВ

В. Д. Эскин, А. Ю. Лопатин\*, А. Е. Тюменцева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: 16alekseylopatin1999@mail.ru

*В работе представлены результаты сравнительного анализа свойств древесно-корьевых композитов на основе коры лиственных и хвойных пород древесины.*

*Ключевые слова: древесно-коревой композит, прочность, анализ, активация, прессование.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF WOOD-BARK COMPOSITES

V. D. Eskin, A. Yu. Lopatin\*, A. E. Tyumentseva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: 16alekseylopatin1999@mail.ru

*The paper presents the results of a comparative analysis of the properties of wood-bark composites based on the bark of deciduous and coniferous wood species.*

*Keywords: wood-measles composite, strength, analysis, activation, pressing.*

Первым и наиболее крупнотоннажным отходом в технологии переработки древесины в деревообрабатывающей отрасли является кора хвойных и лиственных пород древесины.

Кора с точки зрения переработки или утилизации достаточно сложный компонент древесины. Кора неоднородна по своему строению и составу. Основное предназначение коры выполнение особых функций по проведению питательных веществ, выработанных листьями дерева, и защита дерева от неблагоприятных внешних воздействий. Защитную функцию выполняет наружная часть корка, которая защищает дерево от механических повреждений, воздействия насекомых и микроорганизмов, вызывающих гниение, а также от перепада атмосферных температур. Основными элементами луба, выполняющими проводящую функцию, являются ситовидные клетки (у хвойных пород) и ситовидные трубки (у лиственных пород). Они образуют в лубе тонкий проводящий слой толщиной 0,1-0,3 мм. Снаружи кора покрыта отмершей тканью с глубокими трещинами и бороздами, разрывами и чешуйками. У некоторых пород, например у берёзы, гладкая поверхность пробковой ткани сохраняется в продолжении всей жизни [1].

Количество коры, находящейся на древесине, зависит от возраста дерева, условий его произрастания, диаметра ствола. Кора сплавной древесины по своим свойствам будет резко отличаться от коры свежесрубленной древесины, транспортируемой сухопутным транспортом.

Одним из современных направлений переработки древесных отходов, которое широко представлено в работах ряда авторов является механоактивация древесных частиц в кавитационных установках, работающих по принципу роторно-пульсационного аппарата [2, 3,4]. Измельчение частиц до мелкодисперсного состояния осуществляется в водной среде, в сочетании с высокими угловыми скоростями и гидродинамическим ударом. В обрабатываемом материале разрушается лигноуглеводная матрица и анатомические элементы, с одновременным высвобождением химических веществ.

Основной задачей исследований, представленных в данной работе, является проведение сравнительного анализа свойств плит, изготовленных на основе коры лиственных и хвойных пород древесины с целью определения возможных направлений и способов их применения в качестве теплоизоляционных, отделочных или конструкционных материалов в строительной отрасли [5].

Для проведения сравнительного анализа свойств плит, изготовленных на основе коры лиственных пород древесины, в качестве исходного сырья была принята кора березы, осины и кора хвойных пород древесины. Были изготовлены методом горячего прессования три группы образцов. Первая группа на основе коры березы, в составе которой практически полностью преобладала внешняя часть коры (береста). Вторая группа образцов была изготовлена из смеси коры березы и осины, при этом у березы содержание в коре бересты и луба не контролировалось. Соотношение коры березы и осины выдерживалось примерно поровну. Третья группа образцов была изготовлена из смеси коры хвойных пород древесины с целью проведения сравнительного анализа.

Результаты проведенных исследований показали следующее. Все образцы изготовленных плит имеют близкие показатели прочности вне зависимости от породного состава коры. Разница в прочностных показателях находится в пределах погрешности измерения. Более выражено прочность при статическом изгибе меняется в зависимости от плотности образцов. Для всех образцов наблюдается увеличение прочности при статическом изгибе с увеличением плотности. Плотность изменяли от 830 до 1100 кг/м<sup>3</sup>.

В результате математической обработки экспериментальных данных, были получены уравнения регрессии, выражающие зависимость прочности при статическом изгибе образцов материала от плотности.

Для образцов на основе обработанной коры березы:

$$\sigma_{\text{изг}} = -2,826 + 0,033 \rho,$$

на основе обработанной коры лиственных пород:

$$\sigma_{\text{изг}} = 0,914 + 0,029 \rho,$$

на основе обработанной коры хвойных пород:

$$\sigma_{\text{изг}} = -3,517 + 0,034\rho.$$

Коэффициенты регрессии составили соответственно: на основе коры березы:  $R^2=0,9990$ ; на основе коры лиственных пород:  $R^2=0,9973$ ; на основе коры хвойных пород:  $R^2=0,9997$ .

При этом графики линейной зависимости расположены достаточно близко к друг другу, что также подтверждает предположение о том, что свойства плитных материалов на основе механоактивированной коры зависят, прежде всего, от степени измельчения коры и времени ее обработки, а также от условий прессования и незначительно зависят от породного состава корьевой массы.

По полученным данным был сделан вывод: при увеличении плотности плит горячего прессования прочность при статическом изгибе плит возрастает вне зависимости от породного состава обрабатываемой коры. Таким образом, следует отметить, что для изготовления плит на основе механоактивированной коры можно использовать кору как лиственных так и хвойных пород древесины без существенного ухудшения физико-механических свойств материалов.

### Библиографические ссылки

1. Дендрология – URL: <http://dendrology.ru/books/item/f00/s00/z0000030/st002.shtml> (дата обращения: 09.09.2023).
2. Намятов А. В., Баяндин М. А., Казицин С. Н., Ермолин В. Н. Исследование свойств плит малой-плотности из механоактивированных древесных частиц без использования связующих веществ // СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И КАЧЕСТВА ДРЕВЕСИНЫ – 2018 : Материалы УГ Международного симпозиума имени Б. Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения (Красноярск, 10-16 сентября 2018г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. С. 149-151.
3. Казицин С. Н. Получение древесных плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц : дис. канд. техн. наук. Екатеринбург : УГЛУ, 2018. 132 с.
4. Промтов, М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М. А. Промтов. – Москва : Машиностроение, 2001. – 260 с.

5. Лопатин. А. Ю., Тюменцева А. Е., Эскин В. Д., Криворотова А. И. Композиционные материалы из отходов древесного сырья // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. (9–11 ноября 2022, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2022. С. 826–827.

#### References

1. Dendrology – URL: <http://dendrology.ru/books/item/f00/s00/z0000030/st002.shtml> (accessed: 09.09.2023).

2. Namyatov A.V., Bayandin M. A., Kazitsin S. N., Ermolin V. N. Investigation of the properties of low-density plates made of mechanically activated wood particles without the use of binders //STRUCTURE, PROPERTIES AND QUALITIES of WOOD – 2018 : Materials of the Ugolev International Symposium dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordinating Council on Modern Problems Wood Science (Krasnoyarsk, September 10-16, 2018). Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2018. pp. 149-151.

3. Kozitsyn S. N. Production of wood slabs without binders from mechanically activated wood particles :dis. Candidate of Technical Sciences. Yekaterinburg : CORNER, 2018. 132 s.

4. Promtov, M. A. Pulsating rotary type apparatuses: theory and practice / M. A. Promtov. – Moscow : Mashinostroenie, 2001. – 260 p.

5. Lopatin. A. Yu., Tyumentseva A. E., Eskin V. D., Krivorotova A. I. Composite materials from waste wood raw materials // Reshetnev readings : materials of the XVI International Scientific Conference (November 9-11, 2022, Krasnoyarsk) : at 2 o'clock / under the general editorship of Yu. Yu. Loginov ; Sib. gos. aerospace. un-T. Krasnoyarsk, 2022. pp. 826-827.

© Эскин В. Д., Лопатин А. Ю., Тюменцева А. Е., 2023

УДК 676.168

## **ВИДЫ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Л. В. Юртаева, Е. А. Слизикова, Е. Р. Колосова, С. А. Пожаркова, Р. В. Бандура

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 2052727@mail.ru

*В статье рассмотрены отрасли применения целлюлозы. Приводятся дефекты деловой древесины. Показана возможность получения микрокристаллической целлюлозы из сырья альтернативного деловой древесине.*

*Ключевые слова: полимер, дефекты, микрокристаллическая целлюлоза, древесина.*

## **TYPES OF RAW MATERIALS FOR OBTAINING MICROCRYSTALLINE CELLULOSE**

L. V. Yurtayeva, E. A. Slizikova, E. R. Kolosova, S. A. Pozharkova, R. V. Bandura

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2052727@mail.ru

*The article considers the branches of cellulose application. Defects of business wood are given. The possibility of obtaining microcrystalline cellulose from raw materials alternative to business wood is shown.*

*Keywords: polymer, defects, microcrystalline cellulose, wood.*

Целлюлоза – самый распространенный полимер растительного происхождения. Она существует в различных формах, различающихся физическими и химическими свойствами. И является сырьем для множества областей ее потребления: целлюлозно-бумажной промышленности, химической (для изготовления фильтровальных материалов), пищевой (в виде текстурирующего вещества, стабилизатора, эмульгатора, осветлителя, наполнителя и разделителя веществ), текстильной (получение искусственного волокна), косметической (неионогенный поверхностно-активный реагент), электротехнической и радиоэлектронной (электроизоляционные виды бумаг), а так же в медицине, автомобиле- и авиационной (используется при создании частей кузова и салона), военно-промышленном комплексе (в производстве стратегических ракет «Булава» и «Тополь М»), строительстве (в качестве добавки, предотвращающей комкование и слеживание сыпучих материалов), сельском хозяйстве (для сохранения влаги, защиты почвы от сорняков).

Согласно актуальной «Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 года», потенциал увеличения производства целлюлозы в стране составит 11,3 млн. тонн (5 млн. тонн – хвойные породы; 6,3 млн. тонн – лиственные породы). По прогнозу WWF, к 2050 году мировая потребность в древесине увеличится в три раза [1] поэтому необходимо не только высаживать новые деревья, но и сокращать их вырубку.

Такое интенсивное использование лесного фонда постепенно приводит к истощению запасов леса и ухудшению экологической обстановки [2].

Кроме того, древесина как любой другой ресурс, может быть с различными пороками или дефектами. Даже в нормальном развитии дерева происходят отклонения, влекущие за собой болезненные явления – отмирание отдельных частей или всего дерева в целом. Все эти разнообразные отклонения и повреждения влекут за собой понижение технических ее качеств, и носят название фаутов [3]: перенесённые болезни биотического (поражение древесины гетеротрофными организмами (грибами,

бактериями, вирусами), разрушение насекомыми и др.) и абиотического порядка (сучки, механические повреждения, кривизна, закомелистость и другие, не связанные с продолжающимся разрушением патологических факторов). В настоящее время количество поврежденной древесины очень высоко, к примеру, на территории Сибири объем древесины с гнилью составляет около двадцати процентов; затруднённые условия роста из-за неблагоприятных климатических и почвенных условий; повреждения животными и растительными паразитами. Самыми распространёнными видами являются: сибирский шелкопряд, уссурийский полиграф, пипельщик, побеговьюн, хероес; непродуманная деятельность человека в лесу.

Сильнее и многообразнее всего на ход лесообразовательного процесса влияет человек. Люди строят заводы, получают металлы, так нужные человеку, и одновременно, выбрасывая большое количество вредных соединений в воздух, уничтожают леса; лесные пожары.

В связи с этим в лаборатории кафедры машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева ведутся исследования влияния вида сырья после размола (ножевого и безножевого) на процесс получения готовых полуфабрикатов из альтернативного деловой древесине материала [4].

Целью данной работы являлось исследование влияния вида сырья на изменение степени полимеризации мелкодисперсной целлюлозы гидролитической деструкции.

Размол волокнистой массы концентрацией 1 % осуществлялся в полупромышленной дисковой мельнице с 15 °ШР до 83 °ШР. Частота вращения ротора – 2000 об/мин и межножевой зазор – 0,1 мм были выбраны как наиболее эффективные с точки зрения продолжительности размола и степени разработки волокна, на основании ранее проведенных на кафедре МАПТ исследований.

После размола волокнистую массу подвергали гидролизу с целью усиления разрушения структуры целлюлозы и получения из нее мелкодисперсной целлюлозы гидролитической деструкции. Далее проводилась промывка, сушка и диспергирование полученной мелкодисперсной целлюлозы [5].

Анализ полученных результатов показал, что степень полимеризации при 70 °ШР у мелкодисперсной целлюлозы, полученной из костры технической конопли 82, у мелкодисперсной целлюлозы, полученной из биоповрежденной древесины хвойных пород 93, лиственных – 210. Отличие степени полимеризации у разного вида сырья объясняется различием в строении волокон. Так, основную массу целлюлозы хвойных пород древесины составляют длинные лентообразные клетки – трахеиды. Поэтому волокна этих пород обладают большей склонностью к хлопьеобразованию. Основная часть лиственной целлюлозы состоит из клеток механической ткани, называемой либроформом. Это относительно короткие толстостенные клетки и с иглообразными заостренными концами. Элементарное волокно костры технической конопли более короткое и представляет собой отдельную вытянутую, закрытую с обоих концов клетку с утолщенными стенками, имеющую внутри полость.

Таким образом, проведены исследования предварительного размола волокнистых полуфабрикатов из сырья альтернативного деловой древесине на процесс получения микрокристаллической целлюлозы. Выявлено, что наименьшая степень полимеризации наблюдается у костры технической конопли.

### Библиографические ссылки

1. Доклад Всемирного фонда дикой природы (WWF) «Живые леса» // Устойчивое лесопользование. 2012. № 3 (32).
2. Момзякова К. С. Совершенствование технологии получения целлюлозы из травянистых растений. Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Момзякова Ксения Сергеевна. – Казань, 2021. – 150 с.
3. Способ получения микрокристаллической целлюлозы на основе биоповрежденной древесины Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д. – СибГУ им. М. Ф. Решетнева – Красноярск, Хвойные бореальные, 2022, №2. – С.158-164.
4. Investigation of the possibility of obtaining powdered cellulose using a non-knife method of grinding fibrous semi-finished products / E. V. Kaplyov, L. V. Yurtaeva, R. A. Marchenko, and dr.// III Международная научная конференция APITECH-III – 2021: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг APITECH III 2021. Journal of Physics: Conference Series. 2094 (2021) 042069 DOI 10.1088/1742-6596/2094/4/042069.
5. Пат. 2797202 Российская Федерация, МПК D21C 1/04, C08B 15/00. Способ получения микрокристаллической целлюлозы / Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И., Юртаева Л.В., Каплев Е.В., Марченко Р.А. №2022132617: заявл. 13.12.2022: опубл.31.05.2023.

### References

1. Report of the World Wildlife Fund (WWF) "Living forests" // Sustainable forest management. 2012. № 3 (32).
2. Momzyakova K. S. Improving the technology of obtaining cellulose from herbaceous plants. Dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.17.06 / Momzyakova Ksenia Sergeevna. – Kazan, 2021. – 150 p.
3. A method for obtaining microcrystalline cellulose based on bio-damaged wood Yurtayeva L.V., Alashkevich Yu.D. – SibGU named after M. F. Reshetnev – Krasnoyarsk, Coniferous boreal, 2022, No. 2. – pp.158-164.
4. Investigation of the possibility of obtaining powdered cellulose using a non-knife method of grinding fibrous semi-finished products / E. V. Kaplyov, L. V. Yurtaeva, R. A. Marchenko, and dr.// III Международная научная конференция АРИТЕСН-III – 2021: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг АРИТЕСН III 2021. Journal of Physics: Conference Series. 2094 (2021) 042069 DOI 10.1088/1742-6596/2094/4/042069.
5. Pat. 2797202 Russian Federation, IPC D21C 1/04, C08B 15/00. Method of obtaining microcrystalline cellulose / Alashkevich Yu.D., Kovalev V.I., Yurtaeva L.V., Kaplev E.V., Marchenko R.A. No. 2022132617: application 13.12.2022: publ.31.05.2023.

© Юртаева Л. В., Слизикова Е. А., Колосова Е. Р., Пожаркова С. А., Бандура Р. В., 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция

#### «ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТЫ»

<b>Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Васильев А. В., Сунцов С. Б.</b> Прогнозирование долговечности печатных плат спутника 1U CubeSat .....	5
<b>Бельков А. В., Белов С. В., Жуков А. П., Павлов М. С., Пономарев С. В.</b> Тепловое состояние спутника 1U CubeSat при нестационарном тепловыделении на полезной нагрузке .....	8
<b>Беляков А. А., Шулёпов А. И., Папазов В. М.</b> Конструктивная совместимость бортовой аппаратуры в отсеке, способы обеспечения, оптимизация компоновки и связей по бортовой кабельной сети .....	11
<b>Бордачев В. А.</b> Уточнение коэффициента лобового сопротивления при расчете траектории ракеты-носителя схемы тандем .....	13
<b>Бритков А. П., Зверинцева Л. В.</b> Конструктивные особенности установок для абразивно-экструзионных обработки .....	16
<b>Догадкин В. А., Михеев А. Е.</b> Преимущества использования электронно-лучевой сварки в ракетно-космической технике .....	19
<b>Жердев Н. А., Ковалев Д. А., Тимошева А. Ю., Руденко М. С.</b> Разработка модели лонжеронной ракеты с активной системой спасения .....	22
<b>Иванов Е. А., Похабов А. Ю., Иконникова А. А., Кучеренко А. Д.</b> Аналитическое определение несущей способности торцевой вставки вклеенную в сотовую панель для производства космических аппаратов .....	24
<b>Игнатова А. А.</b> Маневрирование капсулы, закрепленной на поверхности Фобоса с помощью троса .....	27
<b>Ковалев Д. А., Жердев Н. А., Тимошева А. Ю., Руденко М. С.</b> Проектирование активной системы спасения лонжеронной модели ракеты .....	30
<b>Крашенинникова О. В.</b> Испытания материалов для ракетно-космической техники .....	33
<b>Кудрявцев И. В.</b> Обоснование закреплений волноводных трактов обеспечивающих значения первой изгибной частоты колебаний и критической нагрузки .....	36
<b>Кузаков Ю. Д.</b> Проблема транспортировки ракет-носителей в Российской Федерации .....	39
<b>Прохоров В. В.</b> Использование крыльчатых двигателей в авиатранспортных средствах .....	41
<b>Рожкова Е. А.</b> Сравнительный анализ использования композитных материалов в ракетах сверхлегкого класса .....	44
<b>Руденко М. С.</b> Влияние воздействия лазерной обработки на конструкционные материалы ракетно-космической техники .....	47
<b>Рукавишникова А. С., Амельченко Н. А.</b> Влияние термической обработки на свойства деталей из титановых сплавов .....	49
<b>Самсонов С. Д., Кольга В. В.</b> Аэростатный способ посадки космического аппарата в атмосфере Венеры .....	52
<b>Трухин В. Р., Кольга В. В.</b> Анализ возможности применения шпоночно-болтового соединения материалов «композит-металл» в ракетной технике .....	55
<b>Чуйко А.</b> Анализ хаотических режимов возмущенного движения твердых тел при действии кусочно-непрерывных возмущений .....	58

## Секция

«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»

<b>Воронин М. Е., Матвиенко С. Е., Двирный В. В.</b> Разработка автоматизированного места вибрационных испытаний космических аппаратов в условиях серийного производства .....	61
<b>Вялов А. И., Зайцева М. П., Шестаков А. С.</b> Современные клеевые материалы для радиоэлектронной аппаратуры и приборов .....	64
<b>Данилов М. Н., Бурнышева Т. В.</b> О применении концепции цифрового двойника узла космического аппарата в задачах контроля усилий в элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций .....	66
<b>Двирный В. В., Шевчук А. А., Двирный Г. В., Сидорова Е. С., Телешун С. Ю.</b> Применение инструментов ТРИЗ для нестандартных решений технических проблем .....	69
<b>Зимин В. Н., Крылов А. В., Филиппов В. С., Шахвердов А. О.</b> О применении термомеханического привода для раскрытия трансформируемых космических конструкций .....	72
<b>Зимин В. Н., Павлов Н. Г.</b> Создание привода для раскрываемых космических конструкций на основе материалов с эффектом памяти формы .....	75
<b>Зимин И. И., Меркулов С. И., Смирнов М. А.</b> Особенности разработки малого космического аппарата для обеспечения серийного производства .....	78
<b>Калиновский В. С., Теруков Е. И., Контрош Е. В., Прудченко К. К., Толкачев И. А., Кузоро В. И., Халиманович В. И.</b> Концентраторный фотоэлектрический модуль из гибридных солнечных элементов на углепластиковой конструкции для солнечных батарей космических аппаратов .....	81
<b>Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., Чалова Ю. А.</b> Двухзеркальные антенны х-диапазона .....	85
<b>Киселева О. К., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., Чалова Ю. А.</b> Модульные космические рефлекторы .....	88
<b>Ковальчук Л. М., Бурнышева Т. В., Кожевников А. Н., Шайдуров С. В.</b> Анализ прочности сетчатой трансформируемой конструкции из композитного материала .....	91
<b>Кравченко Ю. С., Исеева О. А.</b> Проектирование конструкции и интерфейсов адаптера конического космического аппарата .....	95
<b>Лихачев А. Н.</b> Исследование реверсивных трансформируемых конструкций с управляемой морфологией на основе эластомерных термоактивных композиционных материалов .....	98
<b>Максимова К. В., Мочалов В. В., Морозов Н. В., Головенкин Е. Н.</b> Расчет продуктов пассивной интермодуляции приемо-передающих антенн и облучателей .....	101
<b>Моисеев П. П., Викторов А. И., Смирнов В. А., Нечушкин И. И.</b> Компрессионные отрывные электрические соединители без устройств предварительной расстыковки контактов для разделяемых конструкций космического аппарата .....	104
<b>Моисеев П. П., Викторов А. И., Сидоров А. М., Зенкин Е. А.</b> Система контроля развертывания крупногабаритной трансформируемой антенны .....	106
<b>Невзоров А. Д., Слепцов П. Е.</b> Рефлекторы с гибкими рёбрами .....	108
<b>Орлов А. С., Орлов С. А., Пасько А. В.</b> К вопросу испытаний крупногабаритных пространственных конструкций на ударные воздействия высокой интенсивности .....	111
<b>Перевозчикова В. В., Башков И. В.</b> Исследование потери массы углепластика в вакууме .....	113
<b>Ракитина Н. В., Борисов Р. Н., Кожокарь Э. П.</b> Применение средств контроля собственной внешней атмосферы космического аппарата .....	115

<b>Рожкова Е. А., Кустов А. В.</b> Анализ разработок автономных систем управления для трансформации крупногабаритных конструкций в космических аппаратах .....	118
<b>Сабиров Р. А., Фисенко Е. Н.</b> Имитация невесомости балок, подвешенных на тросах .....	121
<b>Сазанков С. И., Соколов Н. Ю., Хвалько А. А.</b> Микропористый металл для тепловой трубы по аддитивной технологии .....	124
<b>Серяков А. В., Конькин А. В., Алексеев Анд. П.</b> Закрученные течения пара в коротких линейных тепловых трубах .....	127
<b>Сецко И. М., Внуков А. А.</b> Оценка возможности коррекции наклона КА в процессе коррекции эксцентриситета по схеме Спитцера .....	130
<b>Слепцов П. Е., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матророва И. В., Чалова Ю. А.</b> Ленточные шарниры и их применение в конструкциях трансформируемых рефлекторов .....	132
<b>Стеблицкая И. В., Захаревич Н. Б., Иванченко Е. А., Клепиков А. Г.</b> Организация рабочего места сборки пирочек с применением принципов бережливого производства .....	135
<b>Телешун С. Ю., Двирный В. В., Храпунова В. В., Двирный Г. В., Шевчук А. А.</b> Особенности применения технологий сварки в орбитальных условиях .....	137
<b>Терлецкий Г. С., Тайгин В. Б.</b> Разработка трансформируемой зеркальной антенны с гибким мембранным отражателем .....	140
<b>Тимофеев А. Н., Тимофеев П. А., Ленковец А. С.</b> К вопросу о композиционных материалах, армированных пековыми углеродными и карбидокремниевыми волокнами .....	143
<b>Тоньшина А. В., Шалыгина Т. А., Дудник А. И., Савенков А. А.</b> Упругий шарнирный узел с увеличенным моментом силы .....	145

## Секция

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

<b>Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Щелканов А. Н., Коваль Р. В., Герасимов Е. В.</b> Разработка и реализация инновационных аддитивных технологий 3D-печати ракетных двигателей малой тяги .....	149
<b>Алексеев В. В., Назаров В. П.</b> Определение гидравлических потерь в охлаждающем тракте РДМТ в программном модуле SOLIDWORKS Flow Simulation .....	152
<b>Горячкин Е. С., Кудряшов И. А., Зубанов В. М., Щербань А. И.</b> Анализ влияния конфигурации привтулочных полостей двухопорных направляющих аппаратов на параметры осевого многоступенчатого компрессора .....	155
<b>Данилов Н. А., Фалькова Е. В., Арнольд А. А., Манохина Э. С.</b> Интегральная модель распределения температурного и динамического пограничных слоев для продуктов сгорания в полостях вращения газовых турбин ЖРД .....	158
<b>Данилов Н. А.</b> Особенности течения в межлопаточном канале турбомашин .....	161
<b>Данилов Н. А., Арнольд А. А.</b> Физическая постановка задачи определения величины и отклонения напора центробежного насоса .....	163
<b>Жуйков Д. А.</b> Прототипирование симуляционной модели экспериментального стенда ТНА ЖРД .....	166
<b>Журавлев В. Ю., Титенков С. В.</b> К вопросу обеспечения точности размеров получаемой траектории труб на трубогибочном агрегате .....	169
<b>Зубанов В. М., Мельников С. А., Харитонов А. А., Лю Син</b> Оценка влияния упрощения выходной кромки сопловых лопаток на пропускную способность межлопаточного канала .....	172
<b>Кирюшкин Г. А., Назаров В. П.</b> Определение градиента температуры в полостях камер РДМТ методом численного моделирования .....	175

<b>Климовский Д. А., Журавлев В. Ю.</b> Уточненная модель зоны пластических деформаций металлического разделителя топливного бака .....	178
<b>Кудряшов И. А., Горячкин Е. С., Мельников С. А., Харитонов А. А., Гатауллина Е. Д.</b> Анализ влияния деформирования проточной части осевого компрессора на их параметры .....	181
<b>Кудряшов И. А., Горячкин Е. С., Попов Г. М.</b> Анализ влияния деформирования проточной части осевой турбины на ее параметры .....	184
<b>Манохина Э. С., Шикарев М. А.</b> Оценка надежности ракетных двигателей малой тяги по результатам механических испытаний .....	187
<b>Мельников С. А., Зубанов В. М., Харитонов А. А., Щербань А. И.</b> Моделирование температурного состояния рабочей лопатки турбины и доводка её плёночного охлаждения .....	190
<b>Назаров В. П., Моисеев В. А., Пиунов В. Ю.</b> Инновационные конструкторские решения и прогрессивные технологии производства ЖРД, разработанных под руководством А. М. Исаева .....	193
<b>Новикова Ю. Д., Прошлецов А. Д., Аргумбаев А. С.</b> Подбор датчика крутящего момента для малоразмерной газотурбинной установки .....	196
<b>Павлов В. Ф., Сазанов В. П., Вакулюк В. С., Семёнова О. Ю., Морозов А. Ю.</b> Исследование влияния остаточных напряжений на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений .....	199
<b>Панасенко В. Ю.</b> Методы исследования работы моделей газовых одноступенчатых осевых турбин ЖРД .....	202
<b>Пелевин В. С., Алексенцев А. А., Блинов А. Д.</b> Проработка конструкции, напыления и целесообразности применения лепестковых газодинамических подшипников для малоразмерного газотурбинного двигателя .....	205
<b>Рутковская М. А., Рутковский В. О.</b> Перспективы применения двухтактных трехцилиндровых радиальных поршневых ДВС для БПЛА .....	207
<b>Талай Е. П., Бритков А. П.</b> Моделирование профиля сопла жидкостного ракетного двигателя малой тяги с применением средств автоматизированного проектирования САД-пакета CATIA V5 .....	210
<b>Татычев В. А.</b> Использование метода численного моделирования для решения задач гидродинамики в полостях элементов ТНА .....	213
<b>Чижов А. А.</b> Двигательная установка на метан-кислороде для сверхлёгкого ракетносителя .....	216
<b>Шестерня В. И., Кирюшкин Г. А., Голиковская К. Ф.</b> Перспективы управления вектором тяги .....	218
<b>Шестерня В. И.</b> Сравнительный анализ методов расчета охлаждения РДМТ, изготовленного по технологии 3D-печати .....	220
<b>Шестерня В. И.</b> Численное моделирование системы охлаждения камеры ракетного двигателя для изготовления методом SLM-печати .....	223

## Секция

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНСТРУКЦИЯХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

<b>Булов А. О.</b> Интенсификации процесса теплообмена за счет нанесения внутренних канавок на теплообменную поверхность .....	227
<b>Исаченко А. А., Захарова Н. В.</b> Автоматизированный теплотехнический контроль на водонапорных станциях для централизованных систем теплоснабжения .....	230
<b>Наставникова С. В.</b> Рекуперация тепла технологических газов, образующихся при производстве алюминия .....	233
<b>Наставникова С. В.</b> Фреоновые технологии в энергоустановках .....	236

<b>Оленева А. Д.</b> Проектирование системы терморегулирования энергетической установки повышенной мощности .....	239
<b>Шевченко Ю. Н., Делков А. В., Мелкозеров М. Г., Кишкин А. А., Абдуллаев М. У.</b> Оценка геометрии входа в рабочее колесо радиальной микротурбины низкой быстроходности .....	242
<b>Шилкин О. В., Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Делков А. В.</b> Возможные конструктивные варианты двухфазных систем терморегулирования космического аппарата .....	245
<b>Шилкин О. В., Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Делков А. В., Абдуллаев М. У.</b> Обзор существующих вариантов двухфазных систем терморегулирования космических аппаратов .....	248

## Секция

## «ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»

<b>Арнгольд А. А., Зуев А. А.</b> Особенности течения с теплообменом на начальных участках каналов проточных частей ТНА ЖРД .....	251
<b>Бегишев А. М.</b> Определение оптимальных начальных условий слива в процессе градуировки датчиков расхода на огневом стенде .....	254
<b>Бредихин С. Г., Блинков Е. В., Самошкин В. М.</b> Ресурсное использование материальной части порохового аккумулятора давления .....	257
<b>Власенко А. В., Косырева А. И.</b> Применение нейронных сетей в процессе производства ракетно-космической техники .....	259
<b>Жежера С. А.</b> Экспериментальная апробация способа программной коррекции упругого зазора в системе слежения по остаточной толщине полотна .....	262
<b>Ленковец А. С., Елаев А. А., Хвостов Р. Е., Митрофанов А. Л.</b> Перспективные металлические композиционные материалы для применения в ракетно-космической технике .....	266
<b>Мацкив А. А.</b> Разработка методики и программного обеспечения для проведения компенсационного расчета цилиндрических и сферических вафельных оболочек, изготавливаемых способом механического фрезерования .....	268
<b>Первова И. Н.</b> Технологические особенности ротационной вытяжки крупногабаритных корпусных элементов сферической формы из алюминиевого сплава 01570М .....	271
<b>Савчин Д. А.</b> Математическое моделирование гидравлических испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей .....	274
<b>Скомороха А. В., Яковлев М. В.</b> Отработка и внедрение технологии высокопроизводительной обработки сталей на станках с ЧПУ .....	277
<b>Смирнов А. Н., Шилов В. П.</b> Применение многослойных твердосмазочных покрытий в трибосопряжениях .....	280
<b>Титенков С. В., Журавлев В. Ю.</b> Алгоритм разработки управляющей программы для гибки труб на трубогибе .....	283
<b>Удод Л. С., Милютин А. Е.</b> Исследование факторов влияющих на несущую способность вставок в сотовых конструкциях .....	286
<b>Швалева Н. А., Фадеев А. А.</b> Перспективы применения импульсного напряжения для электрохимической обработки тонкостенных деталей .....	289

## Секция

## «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»

<b>Алилекова К. С.</b> Воздействие окружающей среды на сигналы в космической навигации и связи .....	293
<b>Алилекова К. С.</b> Системы спутниковой навигации: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и их применение в космической навигации .....	295
<b>Гаипов К. Э., Козловский М. С., Антонов В. М.</b> Аналитический алгоритм определения площади перекрытия множества зон покрытия спутника .....	297
<b>Голубев Е. Н.</b> Интегрированные средства диагностики бортовых компьютеров спутников АО «ИСС» .....	300
<b>Гринберг Г. М., Сидоров В. Г.</b> Концепция умной научно-учебной лаборатории практического радиомонтажа в вузе .....	304
<b>Гущин И. О., Баранов М. Е.</b> Ресурсная деградация солнечных батарей .....	307
<b>Гущин И. О., Харлашина С. В.</b> Принципы гашения дуги автоматического выключателя .....	309
<b>Иванов М. Е.</b> Коррекция переходных процессов систем автоматического управления с помощью нейронных сетей .....	311
<b>Иванов М. Е.</b> Применение нейронных сетей в моделировании систем математического управления .....	313
<b>Крашенинникова О. В., Сидоров В. Г.</b> Перспективы развития малых космических аппаратов .....	315
<b>Минеев С. А., Фидельман В. Р., Вакс В. Л.</b> Организация межспутникового канала связи в терагерцовом частотном диапазоне .....	318
<b>Мусина А. В.</b> Системы управления ориентацией малого спутника .....	321
<b>Назаров И. В.</b> Автоматическое распознавание космических объектов с помощью машинного зрения .....	323
<b>Назаров И. В., Смирнов А. В., Орешенко Т. Г.</b> Мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкций с использованием наномодифицированных композиционных материалов .....	326
<b>Назаров И. В.</b> Искусственный интеллект и машинное зрение в беспилотных аппаратах для исследования космоса .....	328
<b>Плыкин К. Р., Валиханов М. М., Верещагин А. Н., Пустошилов А. С., Лубкин И. А.</b> Исследование времени приема альманаха системы ГЛОНАСС по кодовым сигналам при деградации орбитальной группировки .....	331
<b>Тимофеев В. Р., Орешенко Т. Г.</b> Алгоритмическое обеспечение управления движением шагающих беспилотных аппаратов .....	334
<b>Шпигер Н. В., Белков С. Л., Гаипов К. Э.</b> Алгоритм создание имитационной модели спутниковых группировок в программе GPSS .....	336

## Секция

## «КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

<b>Гегбардт В. А., Клёнкин А. Ю.</b> Обеспечение защиты цепей электропитания от протекания сверхтоков на борту космического аппарата .....	339
<b>Купряшов А. В., Телегин С. В., Пронин А. В., Шестаков И. Я.</b> Использование оксида цинка в качестве наполнителя защитных покрытий электронных приборов аэрокосмической техники .....	341
<b>Спирина Д. А., Патраев Е. В., Трифанов И. В.</b> Методы и средства защиты от космической радиации .....	343
<b>Тимошева А. Ю., Жердев Н. А., Ковалев Д. А., Руденко М. С.</b> Сравнительный анализ бортовой электроники модельных ракет на основе платформ Arduino и RaCEboard .....	345

<b>Трифанов В. И., Спирина Д. А., Трифанов И. В.</b> Особенности построения магнитной защиты от космической радиации .....	348
--	-----

## Секция

**«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

<b>Голованов С. М., Орлов В. И., Федосов В. В.</b> Использование методов кластерного анализа в технологическом процессе формирования электронной компонентной базы космического применения .....	351
<b>Егоров Н. М., Левицкий А. А., Ситников А. М.</b> Экспериментальное исследование дрейфовой скорости носителей заряда в структурах арсенида галлия в сильных электрических полях .....	355
<b>Поляков Д. И., Левицкий А. А.</b> О согласовании фильтров на поверхностных акустических волнах и расчете емкости встречно-штыревого преобразователя .....	358
<b>Фадеев В. О., Маринушкин П. С.</b> Автоматизация проектирования трансверсальных фильтров на ПАВ в среде MATLAB .....	361
<b>Шевелева А. А., Маринушкин П. С.</b> Экстракция параметров компактных моделей биполярных транзисторов .....	364

## Секция

**«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

<b>Евтифьев М. Д.</b> Анализ наземной экспериментальной отработки орбитального корабля «Буран» .....	368
<b>Крашенинникова О. В.</b> Проблема получения достоверных характеристик при проведении испытаний для ракетно-космической техники .....	371
<b>Митрофанова А. Н., Жирнова Е. А.</b> Контроль метрологических характеристик при аттестации камер тепла и холода .....	374
<b>Муродов Г. А., Муминов А. А.</b> Испытательная камера для малогабаритных изделий авиационной техники .....	376
<b>Орлов А. С., Орлов С. А., Пасько А. В.</b> Стенд для испытаний на высокоинтенсивные ударные воздействия приборов и оборудования .....	379
<b>Салтыков В. А., Юманов А. К., Позняк Д. Р., Голованских О. И.</b> Анализ результатов испытания стартовой установки и пути ее совершенствования .....	381
<b>Юртаев Е. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В., Двирный В. В., Двирный Г. В.</b> Способ моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов в термовакуумной камере .....	384

## Секция

**«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ»**

<b>Великанов Д. Д.</b> Возможность использования формации малых космических аппаратов для научных экспериментов .....	388
<b>Кадочников Д. М., Кададова А. В., Уткин В. В.</b> Об оптической системе связи для малых космических аппаратов .....	391

<b>Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е.</b> Тенденции развития космических аппаратов форм-фактора CubeSat для исследования дальнего космоса .....	394
<b>Кустов Н. Д.</b> Сетевой стек в концепции низкоскоростной технологической межспутниковой сети .....	397
<b>Лапухин Е. Г., Потугина Д. А., Лапухин Т. Е.</b> Наземный сегмент радиолинии S-диапазона для ReshUCube-2 .....	400
<b>Лукьянов М. М.</b> Баллистический прогноз малого космического аппарата ReshUCube-2 .....	402
<b>Морина З. В.</b> Динамика углового движения космических аппаратов с диссипативным демпфером .....	405
<b>Черников П. С., Хамидуллина Н. М., Зефирова И. В.</b> Анализ воздействия ионизирующего излучения космического пространства на интегральные микросхемы платформ формата CubeSat .....	408
<b>Шимова О. Е., Зуев Д. М.</b> Организация эксплуатации спутника ReshUCube-1 .....	411

## Секция

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

<b>Бабий И. А.</b> Оценивание наземной биомассы Южной Сибири по данным радиолокационной съемки Sentinel-1 и PALSAR-2 .....	415
<b>Бахтина А. В.</b> Проверка гипотез о независимости спектральных признаков данных дистанционного зондирования антропогенной территории .....	418
<b>Гончаров А. Е., Гончарова Е. А.</b> Проблема привязки снимков гидролокатора бокового обзора к системе спутниковой навигации .....	421
<b>Им С. Т., Ли В. Г.</b> Пространственный регрессионный анализ динамики растительного покрова Хакасии .....	424
<b>Им С. Т., Ли В. Г.</b> Разработка инструмента генерации безоблачных композитов из снимков MODIS в среде ESRI ArcGIS .....	427
<b>Лапко А. В., Лапко В. А., Тубольцев В. П.</b> Методика агрегирования результатов автоматической классификации статистических данных .....	430
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Оценивание числовых характеристик закона распределения случайной величины по данным большого объема .....	433
<b>Тубольцев В. П.</b> Динамика эвапотранспирации вечнозеленых хвойных лесов Красноярского края .....	436
<b>Тубольцев В. П.</b> Определение эвапотранспирации по данным дистанционного зондирования земли .....	439
<b>Юронен Ю. П., Насыров И. Р., Ушаков В. А.</b> Температурные изменения водной поверхности северной части тихоокеанского океана в период с 2005 по 2021 год по данным дистанционного зондирования земли .....	442

## Секция

**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

<b>Аврамчиков В. М., Верхотуров К. И., Пономарёв В. А.</b> Пакеты финансовой помощи банков транспортной отрасли России на примере авиакомпании ОАО «ЮТэйр» .....	447
<b>Ачкасова Е. А., Семичев А. А., Бойко О. Г.</b> Анализ замены аэродромного транспорта с двигателями внутреннего сгорания машинами на электрической тяге .....	450

<b>Елизарьева М. Г., Шатных К. П.</b> Особенности эксплуатации БПЛА при низковысотном и дисперсном распылении .....	454
<b>Елизарьева М. Г., Бадыгов В. Ф.</b> Измерение магнитного поля с использованием герконового датчика .....	457
<b>Елизарьева М. Г., Бадыгов В. Ф.</b> Сравнение датчиков на эффекте Холла и герконовых при измерении магнитного поля .....	460
<b>Кормильчик А. Н., Мусонов В. М., Бадыгов В. Ф.</b> Повышение эксплуатационно-технических характеристик авиационного радиовысотомера .....	463
<b>Максимова В. В., Бойко О. Г., Каус А. В., Муртазин И. М.</b> Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий .....	466
<b>Муминов А. А., Муродов Г. А.</b> Прогнозирование температуры масла в IDG с использованием рекуррентной нейронной сети с добавлением LSTM слоя .....	469
<b>Муртазин И. М., Каус А. В., Максимова В. В., Бойко О. Г.</b> Исследование проблем авиационно-технического обеспечения зарубежной авиационной техники и пути их решения .....	472
<b>Нартов Е. А.</b> Современные проблемы практической подготовки студентов по техническому обслуживанию воздушных судов с применением виртуальных лабораторных комплексов .....	475
<b>Сяков Е. Е., Сяков В. Е., Ачкасова Е. А., Бойко О. Г.</b> Анализ перспектив использования воздушного судна Ту-214 .....	478

## Секция

## «ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

<b>Абрамов Н. А., Михайлов И. Р., Долматов С. Н.</b> Определение температуры кипения автомобильного антифриза .....	481
<b>Агафонов М. А., Кондаков И. С., Пелымская А. А., Ручкин Л. В.</b> Анализ способов автоматического производства углеродной ткани для космической и авиационной промышленности .....	484
<b>Анисимова К. Г., Шангина Е. А., Стрижак Д. В.</b> Оптимизация обработки деталей для КА сложных криволинейных поверхностей с применением стратегии фрезерования по нормали к поверхности .....	487
<b>Артемьев А. А., Гайдук А. С., Искров Н. С., Сидун Н. А.</b> Методы диагностики состояния литий-ионного аккумулятора .....	491
<b>Бинчуров А. С., Усевич Н. И., Гордеев Ю. И., Мельчуков К. А., Филиппов С. В.</b> Изучение процессов формирования микронеровностей на поверхностях деталей при фрезоточении .....	493
<b>Вервейко Д. С., Мурыгин А. В., Злобин С. К., Гусев В. Ю., Зайцев Р. В.</b> Математическое моделирование лазерной сварки заготовки гибкой волноводной секции космического аппарата .....	496
<b>Гайдук А. С., Артемьев А. А., Искров Н. С., Сидун Н. А.</b> Параметры диагностики для определения неисправности литий-ионного аккумулятора .....	498
<b>Гераськина М. Е., Бакач В. А.</b> Изготовление платы из стеклотекстолита с покрытием фольгированной пленкой .....	500
<b>Гришин А. А.</b> Методика аналитического расчета напряженно-деформированного состояния контактных колец токосъемных устройств .....	503
<b>Евсеев Ф. Д.</b> Разработка технологии изготовления волноводов с литыми уголками с применением низкотемпературной пайки по серебряному покрытию .....	506
<b>Евсеев Ф. Д., Удод Л. С.</b> Разработка метода изготовления литых волноводных фланцев с улучшением поверхности при помощи анаэробного адгезионного состава .....	508

<b>Зырянов Е. Ю., Смирнов П. Н., Смирнов Н. А.</b> Формализация контроля положения центра тяжести системы тел в технологическом процессе сборки аппаратов специального назначения .....	510
<b>Иванов П. А., Левко В. А.</b> Анализ топографии внутренней поверхности изогнутой заготовки полученной методом селективного лазерного сплавления до и после обработки абразивным потоком .....	512
<b>Искров Н. С., Артемьев А. А., Гайдук А. С., Сидун Н. А.</b> Поддержание температурного режима литий-ионных аккумуляторных батарей .....	515
<b>Каргапольцев С. К., Большаков Р. С.</b> Экспресс-метод определения остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов .....	518
<b>Климов С. А., Носков Ф. М.</b> Исследование микроструктуры и фазового состава карбидостали, полученной индукционной наплавкой .....	521
<b>Кондаков И. С., Агафонов М. А., Пельмская А. А., Шинко А. Е.</b> Устройство автоматизации производства крупногабаритных изделий из углепластика .....	524
<b>Криволицкий С. А., Орешенко Т. Г., Кулагина С. И.</b> Совершенствование технологии FDM печати пластика различными производителями .....	526
<b>Лузанов О. Р., Снежко А. А., Кузнецов В. В.</b> Технологические аспекты WAAM при формировании сварного валика .....	528
<b>Моружко А. В., Концеренко А. А., Жуков М. П., Терентьев Н. А.</b> Влияние различных модификаторов на размер зерна алюминия и его сплавов .....	531
<b>Пельмская А. А., Кондаков И. С., Агафонов М. А., Шинко А. Е., Ручкин Л. В.</b> Использование портальных манипуляторов при изготовлении деталей ракет .....	534
<b>Причина А. С., Тюрин К. С., Скрипка А. В., Сысоева Л. П., Раменская Е. В.</b> Алгоритм составления управляющих программ изготовления концевых фрез .....	536
<b>Тимофеев В. В., Трифанов И. В., Патраев Е. В.</b> Расчет давления необходимого для гофрирования волновода .....	539
<b>Тимофеев В. В., Трифанов И. В., Малышев Д. О.</b> Расчет сил, возникающих при технологическом процессе скручивания волновода .....	542
<b>Тюрин К. С., Причина А. С., Сысоева Л. П., Янковская Н. Ф., Раменская Е. В.</b> Инструментальный конфигуризатор для проектирования концевых фрез .....	545
<b>Хафизов А. Р.</b> Разработка и изготовление вибро-вакуумной установки .....	548

## Секция

## «МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ»

<b>Баяндина М. М., Кустов А. В.</b> Основные гидродинамические зависимости для определения гидравлического сопротивления вихревых контактных устройств ректификационных колонн .....	552
<b>Галиев А. Р., Есина П. А., Корнев В. М.</b> Основные проблемы, возникающие в процессе наведения спутника .....	555
<b>Есина П. А., Галиев А. Р., Корнев В. М.</b> Устройства гравитационной стабилизации в конструкции малого космического аппарата .....	557
<b>Кустов А. В., Баяндина М. М.</b> Влияния сил инерции на диаметр парового пузыря при ректификации .....	560
<b>Межев В. Г., Брангин Д. Ю., Приходько А. С.</b> Конструирование валов промышленного оборудования с элементами САПР .....	563
<b>Непомнящий В. С., Артищева Н. А.</b> Модернизация стенда для проверки тормозной системы .....	566
<b>Пашковский А. В.</b> Механический гистерезис при поперечном изгибе упругого стержня с учётом сжимаемости .....	568

<b>Рожкова Е. А., Кустов А. В.</b> Исследование механических вибраций и их управление в конструкциях космических аппаратов .....	570
<b>Скоробогатов К. А., Шереметьев Н. С., Артищева Н. А.</b> Анализ эффективности и безопасности грузоподъемного барабана .....	573
<b>Соболева А. А., Долматов С. Н., Артищева Н. А.</b> Применение фрикционной муфты с целью снижения пиковых нагрузок на привод сушильного барабана .....	576
<b>Суханова О. А., Трифанов И. В.</b> Комбинированный метод смазки червячных редукторов .....	580

## Секция

**«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

<b>Еромасов Р. Г., Васильева М. Н., Симонова Н. С.</b> Влияние модифицирования нановолокнами $Al_2O_3$ на свойства кордиеритовой огнеупорной керамики .....	583
<b>Казина М. И., Гриценко Е. М.</b> Компьютерное моделирование нанороботов: будущее ремонта космических аппаратов .....	585
<b>Карпов Е. С.</b> Реализация RTM-метода производства композиционных материалов на базе СибГУ НОЦ ИКИВТ .....	588
<b>Кошелев А. А., Яковлев И. А., Варнаков С. Н.</b> Исследование процессов эпитаксиального роста германия на поверхности $Fe_3Si/Si(111)$ .....	591
<b>Подшибякина Е. Ю., Шиманский А. Ф., Васильева М. Н., Юрьев П. О., Городищева А. Н.</b> Влияние модифицирования нановолокнами $Al_2O_3$ на свойства керамики из плавленного кварца .....	594
<b>Полукчу К. Е., Корепанов Л. Е.</b> Применение аддитивных технологий в авиакосмической промышленности .....	596
<b>Рунов Р. В., Гельгорн А. В.</b> Время релаксации и импеданс в полупроводниках $Sm_xMn_{1-x}S$ .....	599
<b>Семенуха О. В., Воронина С. Ю., Фесик С. А.</b> Возможность применения тензочувствительного нанокпозиционного материала для мониторинга состояния трансформируемых конструкций .....	601
<b>Теплинская А. С., Федоров А. С.</b> Теоретическое исследование диэлектрической проницаемости металлических нанопленок в широком диапазоне частот .....	604
<b>Харьков А. М., Ситников М. Н.</b> Эффект Нернста–Эттингсгаузена в нестехиометричном сульфиде марганца .....	607
<b>Черемных Н. А., Никитинский О. С.</b> Диэлектрическая восприимчивость в сульфиде марганца с редкоземельным замещением .....	610

## Секция

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
(Газодинамика, гидродинамика, теория упругости и пластичности, реология)»**

<b>Белолипецкий В. М., Генова С. Н.</b> Численный алгоритм для исследования годовой динамики вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах .....	614
<b>Васильев Е. Н.</b> Расчет динамики образования инея на плоской поверхности при контакте с потоком влажного воздуха .....	617
<b>Васильев Е. Н.</b> О выборе математической модели для описания динамики ледяного покрова .....	620
<b>Вяткин А. В., Кучунова Е. В.</b> Решение двумерного уравнения переноса в дивергентной форме консервативным полулагранжевым методом на сетке с разными шагами по времени .....	623

<b>Дектерев А. А., Сентябов А. В., Дектерев Д. А., Вавилов Д. В., Дектерев Ар. А.</b> Исследование аэродинамики ЛА с циклическими движителями .....	625
<b>Дектерев Д. А., Дектерев Ар. А., Вавилов Д. В., Платонов Д. В., Необъявляющий П. А.</b> Комплекс лабораторного оборудования для экспериментальных исследований аэродинамики модельных объектов .....	628
<b>Евтихов Д. О.</b> Численно-аналитическое решение задачи Коши для идеальной пластичности .....	630
<b>Орлов М. Ю., Глазырин В. П., Фазылов Т. В.</b> Численное моделирование процесса пробития ледяного блока, защищенного тонким стальным слоем .....	633
<b>Рабецкая О. И., Лопатин А. В.</b> Устойчивость сжатой ортотропной цилиндрической панели со свободным краем .....	636
<b>Сабиров Р. А., Сенашов С. И., Гомонова О. В.</b> К моделированию выброса рельсовой плети .....	638
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Напряженно-деформированное состояние неоднородной консоли .....	641
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> О решение задачи Коши для уравнений упругости в динамическом случае .....	643
<b>Шанько Ю. В.</b> Об одном классе точных решений двумерного уравнения неоднородной акустики .....	646

## Секция

## «ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

<b>Антишин Д. В., Кошкин А. В., Лебедева Д. С., Стручинская Е. А.</b> Оценка загрязнения почвогрунта эфирами целлюлозы территорий ФГУП «по КХК Енисей» .....	648
<b>Волкова Д. С., Чудин О. С., Верпекин В. В.</b> Синтез новых пинцерных комплексов платины ROSOP <sup>ph</sup> -типа, содержащих непредельные спирты .....	650
<b>Голенко Э. И., Боброва А. В., Роот Е. В.</b> Доказательство строения (этан-1,2-диилбис(окси))бис(этан-2,1-диил) бис(2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1н-пиразол-1-ил)ацетата) .....	652
<b>Держаева А. В., Недорубов А. С., Круглякова Л. А., Пехотин К. В.</b> Влияние диоксида свинца на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана в неизотермических условиях .....	655
<b>Дюрба Н. П., Вдовина Е. Р., Ившина В. В., Гаврилова Н. А.</b> Синтез и строение бис(1-нитрозо-нафталин-2-олат) 1,6-гександиамония .....	658
<b>Кондрасенко А. А., Королькова И. В., Жилин К. П.</b> Выделение оксида кремния из шламов сподуменового концентрата методом автоклавного выщелачивания .....	661
<b>Корешкова Д. А., Симакова И. Л.</b> Разработка одностадийного синтеза охлаждающего агента-ментола из цитрала .....	663
<b>Косицына А. С., Корякова Т. М., Сафин В. А.</b> Переработка буровых шламов термолизом .....	665
<b>Косицына А. С., Косицына С. С., Сафин В. А., Бурюкин Ф. А.</b> Анализ продуктов мягкого крекинга коммерческих полиолефинов методом ИК-спектроскопии .....	667
<b>Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Голубцова О. А., Держаева А. В.</b> Термолиз 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана в присутствии диоксида титана .....	670
<b>Кучина К. Ю., Полиенко Т. В., Боброва А. В., Роот Е. В.</b> Синтез этил 2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1н-пиразол-1-ил)пропаноата .....	673
<b>Миронова В. А., Гирн А. В.</b> Влияние компонентов электролита на цвет МДО-покрытий алюминиевых и титановых сплавов .....	676
<b>Нижибовская Д. К., Агеев Я. И., Бобров П. С.</b> Синтез пиримидилзамещенного 3-метоксиметил-5-(п-хлорфенил)-4-нитропиразола .....	678

<b>Нижибовская Д. К., Агеев Я. И., Бобров П. С.</b> Синтез пиримидилзамещённого 3-метоксиметил-5-( $\gamma$ -пиридирил)-4-нитрозопиразола .....	681
<b>Ольчев Д. А., Бобров П. С., Субоч Г. А.</b> Исследование условий циклоконденсации дигидралазина с изонитрозобензоилацетоном .....	685
<b>Полиенко Т. В., Кучина К. Ю., Боброва А. В., Роот Е. В.</b> Синтез 1,2-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1h-пиразол-1-ил)метил)бензола .....	688
<b>Поляк Н. С., Чижевская М. В.</b> Применение мембранного электролиза для очистки растворов .....	691
<b>Хафизов А. Р.</b> Химическое восстановление меди на диэлектриках .....	694
<b>Хафизов А. Р.</b> Способы улучшения гальванических покрытий .....	697
<b>Худолей М. А., Лесик Е. И., Венченко Е. П., Волчкова О. Г.</b> Разработка технологии получения битумно-полимерной мастики на основе вторичных полиолефинов .....	700
<b>Чижевская М. В.</b> Литий: обзор технологий производства и рынка сбыта .....	702
<b>Юнусова П. Р.</b> Синтез и изучение координационных свойств новых бета-дикетонов и кетоиминов на их основе .....	705

## Секция

## «ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

<b>Аникин М. Н., Тасейко О. В.</b> Временная динамика факторов риска опасных природных явлений на территории СФО .....	709
<b>Берденко Н. Л., Черкасова Н. Г.</b> Мониторинг и прогнозирование техногенных чрезвычайных ситуаций на месторождениях нефти и газа .....	712
<b>Борисов Н. И., Бельская Е. Н.</b> Выявление причин возникновения несчастных случаев на предприятиях компании «РУСАЛ» .....	715
<b>Калиманова Л. С., Тасейко О. В.</b> Ингаляционные неканцерогенные риски на основании эволюционных моделей от болезней пищеварительной системы населения г. Красноярск .....	718
<b>Кононова А. Э., Крылова О. К.</b> Управление охраной труда на ООО «Новоангарский обогатительный комбинат» .....	721
<b>Куваев С. Ю., Крылова О. К.</b> Обеспечение безопасности производственных процессов в цехе лесопереработки ООО «Ротекс-С» .....	723
<b>Лагно П. В., Черкасова Н. Г.</b> Исследование свойств иловых отложений очистных сооружений г. Красноярск .....	726
<b>Ларичева Ю. С., Бельская Е. Н.</b> Исследование шумовых характеристик при работе деревообрабатывающего оборудования ООО «Союз» .....	729
<b>Макар Н. И., Соболева С. В., Есякова О. А.</b> Биологический метод очистки загрязнения почвенного покрова от нефтепродуктов .....	732
<b>Можгерин А. В., Паклин Н. Н., Логинов Ю. Ю.</b> Численное моделирование дефектостойкости в теллуриде кадмия при импульсном тепловом воздействии .....	735
<b>Нестерова М. Г., Жирнова Е. А.</b> Обеспечение безопасности эксплуатации климатической камеры .....	737
<b>Панина Э. И., Хилюк А. В.</b> Специфика внедрения культуры безопасности предприятия .....	740
<b>Пронин Е. Е., Стопа Д. А., Лунева Т. А., Слащинин Д. Г., Семенов Е. Ю.</b> Исследование гороховой муки для основы космопита на триписингибирующую активность .....	742
<b>Саулова Т. А.</b> Инновационная технология снегоочистки кровель зданий – элемент безопасности инфраструктуры воздушного транспорта .....	745
<b>Саулова Т. А.</b> Инвестиционные преимущества технологии пневмоочистки кровель от снега .....	748

<b>Саулова Т. А., Маховская И. С.</b> Падение с высоты: пути снижения травматизма в коммунальной сфере .....	751
<b>Сиротенко Р. Т., Тасейко О. В.</b> Оценка потенциальных рисков опасных производственных объектов в Сибирском федеральном округе .....	754
<b>Смирнов Е. Г., Герасимова Л. А.</b> Экологичность процесса производства и эксплуатации демонстрационного стенда «Пневмогидравлическая система 8К-14» .....	756
<b>Сугак Е. В.</b> «Регуляторная гильотина» техносферной безопасности .....	759
<b>Федоров М. С., Герасимова Л. А.</b> Влияние эксплуатации системы управления стенда для регистрации характеристик солнечных батарей на окружающую среду .....	762
<b>Хилюк А. В.</b> Зависимость поляризации сорбента от размера его фракции .....	764
<b>Чагарина Е. В., Бельская Е. Н.</b> Анализ качества сточных вод «Красноярской ТЭЦ-1» .....	767

## Секция

## «КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО СЫРЬЯ»

<b>Абрамов Н. А., Михайлов И. Р., Долматов С. Н.</b> Технология строительства искусственных островов с применением пакетов из древесных отходов .....	771
<b>Акинина Е. В., Дук Д. В., Елисеев С. Г., Ермолин В. Н.</b> Исследование способов изменения проницаемости древесины березы .....	774
<b>Аркинова М. Е., Ягудина Г. З., Каюкова М. А., Садаева А. С., Демиденко Н. Ю.</b> Влияние компонентного состава растительных субстратов на процесс биоокисления грибами рода <i>Pleurotus</i> .....	777
<b>Аркинова М. Е., Ягудина Г. З., Каюкова М. А., Садаева А. С., Демиденко Н. Ю.</b> Микробиологические перспективы выращивания грибов на растительных субстратах .....	780
<b>Барина Н. С., Исаева Е. В.</b> Определение флавоноидов в экстрактах листьев тополя Красноярского края .....	783
<b>Баяндин М. А.</b> Формирование структуры плит без связующих из механоактивированных древесных частиц .....	786
<b>Буглаев С. В., Федосеев Н. А., Эскин В. Д., Криворотова А. И.</b> Исследование свойств минеральных композитов на основе отходов деревоперерабатывающих производств .....	789
<b>Войнов Н. А., Богаткова А. В., Земцов Д. А., Чернов В. А.</b> Тарелка диабатической ректификационной колонны .....	792
<b>Голушко Р. С., Амбросович Ю. А., Земцов Д. А.</b> Сравнительный анализ гидравлических и пневматических форсунок .....	795
<b>Иванников Д. В., Потапенко С. А., Ерёмченко О. Н., Кох Ж. А.</b> Перспективы использования скорлупы кедрового ореха в производстве кваса брожения .....	798
<b>Иванников Д. В., Потапенко С. А., Ерёмченко О. Н.</b> Возможность использования кофейного жмыха и скорлупы кедрового ореха в процессах биоконверсии .....	801
<b>Иванов З. А., Байдунов Б. А., Васюк А. Е., Есякова О. А.</b> Методы переработки композитных упаковочных материалов .....	804
<b>Исаева Е. В., Харченко А. И., Мамаева О. О., Сербина Л. М.</b> Конверсия коры хвойных грибами <i>Pleurotus pulmonaris</i> .....	808
<b>Казин С. Н., Тримасова О. В.</b> Гигроскопические свойства плит без связующих веществ средней плотности из механоактивированных древесных частиц .....	811
<b>Каплёв Е. В., Алашкевич Ю. Д., Юртаева Л. В., Патраков В. А., Овчинников В. С.</b> Исследование влияния конструктивных параметров безножевой размалывающей установки на процесс размола .....	814

---

<b>Карелина А. А., Алашкевич Ю. Д., Кожухов В. А., Хохлов К. А.</b> Влияние межножевого зазора дисковой мельницы на качество бумажной продукции .....	817
<b>Косицына А. С., Юмашев М. Е., Косицына С. С.</b> Экстракция растительных масел с использованием различных растворителей .....	820
<b>Криворотова А. И., Федосеев Н. А., Буглаев С. В., Тюменцева А. Е., Лопатин А. Ю.</b> Исследование возможности переработки вторичных отходов мебельных производств .....	822
<b>Кульшманова Н. Н., Степанова Э. Ф., Кукушкин А. А., Стороженко С. Е.</b> Технология получения и анализ экстракта родиолы розовой .....	825
<b>Острякова В. А.</b> Использование механоактивированной массы в качестве связующего для получения древесного композита .....	828
<b>Потапенко С. А., Иванников Д. В., Еременко О. Н., Кох Ж. А.</b> Квас на берёзовом соке с использованием овощного сырья .....	830
<b>Ротарь Е. Н., Лесик Е. И., Худолей М. А.</b> Получение и исследование углеродных сорбентов .....	833
<b>Семилет С. А., Яровая В. И., Марченко Р. А., Гранкин Н. Г., Яровой С. В.</b> Влияние гарнитуры с окружными ножами на бумагообразующие свойства при размоле целлюлозы из лиственной и хвойной пород древесин .....	836
<b>Сёмин А. В., Амбросович Ю. А.</b> Обзор напорных ящиков в целлюлозно-бумажной промышленности .....	840
<b>Слепых Д. А., Яровая В. И., Марченко Р. А., Еремеев М. О., Яровой С. В.</b> Анализ физико-механических показателей образцов химико-термомеханической массы .....	843
<b>Смертин Н. В.</b> Перспектива создания композитных материалов из фаутной древесины .....	845
<b>Тихонова А. О., Исаева Е. В.</b> Фосфолипиды кормового продукта на основе листьев .....	847
<b>Тюменцева А. Е., Лопатин А. Ю., Эскин В. Д., Криворотова А. И.</b> Анализ свойств клееных материалов на основе термически модифицированного шпона .....	850
<b>Федоров В. С., Рязанова Т. В., Мамаева О. О.</b> Получение целлюлозного продукта органосольвентным способом из древесных отходов сосны обыкновенной <i>Pinus sylvestris</i> .....	853
<b>Хохлов К. А., Кожухов В. А., Алашкевич Ю. Д., Карелина А. А.</b> Влияние скорости вращения ротора дисковой мельницы на физико-механические показатели бумажной продукции .....	856
<b>Чернов В. А., Земцов Д. А., Дерягина Н. В., Войнов Н. А.</b> Влияние парциальной конденсации при разделении скипидара .....	859
<b>Шотов А. А., Матыгулина В. Н., Чистова Н. Г.</b> Снижение себестоимости и токсичности ДВП за счет использования коры в деревоволокнистой композиции .....	862
<b>Эскин В. Д., Лопатин А. Ю., Тюменцева А. Е.</b> Сравнительный анализ свойств древесно-корьевых композитов .....	865
<b>Юртаева Л. В., Слизикова Е. А., Колосова Е. Р., Пожаркова С. А., Бандура Р. В.</b> Виды сырья для получения микрокристаллической целлюлозы .....	868

## CONTENTS

### *Section*

#### “AIRCRAFT DESIGN AND MANUFACTURE, SPACE RESEARCH AND PROJECTS”

<b>Azin A. V., Ponomarev S. V., Ponomarev S. A., Vasilyev A. V., Suntsov S. B.</b> Predicting the durability of printed boards for 1U CubeSat satellite .....	5
<b>Belkov A. V., Belov S. V., Zhukov A. P., Pavlov M. S., Ponomerev S. V.</b> 1U CubeSat thermal state under nonstationary heat generation from a payload .....	8
<b>Belyakov A. A., Shulepov A. I., Papazov V. M.</b> Structural compatibility of on-board equipment in compartment, reaching procedures, optimization of layout and leads using the on-board cable system .....	11
<b>Bordachev V. A.</b> Refinement of the drag coefficient when calculating the trajectory of the tandem launch vehicle .....	13
<b>Britkov A. P., Zverintseva L. V.</b> Design features of installations for abrasive extrusion processing .....	16
<b>Dogadkin V. A., Mikheev A. E.</b> Advantages of using electron beam welding in rocket and space technology .....	19
<b>Zherdev N. A., Kovalev D. A., Timosheva A. Yu., Rudenko M. S.</b> Designing of a spar rocket model with an active rescue system .....	22
<b>Ivanov E. A., Pohabov A. Yu. Ikonnikova, A. A., Kucherenko A. D.</b> Analytical determination of the load-loading capacity of the end inserts glued into a honeycomb panel for the production of space vehicles .....	24
<b>Ignatova A. A.</b> Maneuvring a capsule fixed to the surface of phobos with a tether .....	27
<b>Kovalev D. A., Zherdev N. A., Timosheva A. Yu., Rudenko M. S.</b> Designing an active rescue system for a rocket spar model .....	30
<b>Krashennnikova O. V.</b> Prospects for the development of small spacecraft .....	33
<b>Kudryavtsev I. V.</b> Justification of waveguide supports providing value of first eigenfrequency of bending vibration and critical load .....	36
<b>Kuzakov Yu. D.</b> The problem of transporting launch rockets in Russian Federation .....	39
<b>Prokhorov V. V.</b> The use of wing thrusters in air transport vehicles .....	41
<b>Rozhkova E. A.</b> Comparative analysis of the use of composite materials in ultra-light rockets .....	44
<b>Rudenko M. S.</b> Influence of laser processing on structural materials of rocket and space equipment .....	47
<b>Rukavishnikova A. S., Amelchenko N. A.</b> The effect of heat treatment on the properties of titanium alloy parts .....	49
<b>Samsonov S. D., Kolga V. V.</b> Balloon method of landing a spacecraft in the atmosphere of Venus .....	52
<b>Trukhin V. R., Kolga V. V.</b> Analysis of the possibility of applying keybolt connection of composite-metal materials in rocket engineering .....	55
<b>Chuiko A.</b> Analysis of chaotic modes of perturbed motion of solid bodies under the action of piecewise continuous perturbations .....	58

### *Section*

#### “LARGE DIMENSION TRANSFORMED STRUCTURES OF SPACECRAFT”

<b>Voronin M. E., Matvienko S. E., Dvirniy V. V.</b> Development of an automated vibration test site for spacecraft under serial production conditions .....	61
--	----

<b>Vyalov A. I, Zaytseva M. P., Shestakov A. S.</b> Modern adhesive materials for radio electronic equipment and devices .....	64
<b>Danilov M. N., Burnysheva T. V.</b> On the application of the concept of a digital twin of a spacecraft node in applications of control of forces in elements of large-sized transformable space structures .....	66
<b>Dvirniy V. V., Shevchuk A. A., Dvirniy G. V., Sidorova E. S., Teleshun S. Yu.</b> Application of tips tools to solve non-standard technical problems .....	69
<b>Zimin V. N., Krylov A. V., Filippov V. S., Shakhverdov A. O.</b> About the application of a thermomechanical actuator for the deployment of transformable space structures .....	72
<b>Zimin V. N., Pavlov N. G.</b> Development of an actuator for deployment of transformable space structures which is made of material with a shape memory effect .....	75
<b>Zimin I. I., Merkulov S. I., Smirnov M. A.</b> Features of the development of the small spacecraft to ensure mass production .....	78
<b>Kalinovskii V. S., Terukov E. I., Kontrosh E. V., Prudchenko K. K., Tolkachev I. A., Kuzoro V. I., Khalimanovich V. I.</b> Concentrator photovoltaic module of hybrid solar cells on a carbon frame for solar battery of spacecraft .....	81
<b>Kisanov Yu. A., Tserikhov V. I., Matrosova I. V., Chalova Yu. A.</b> Dual-mirror x-band antennas .....	85
<b>Kiseleva O. K., Kisanov Yu. A., Tserikhov V. I., Matrosova I. V., Chalova Yu. A.</b> Modular space reflectors .....	88
<b>Kovalchuk L. M., Burnysheva T. V., Kozhevnikov A. N., Shaidurov S. V.</b> Analysis of the strength of a mesh transformable structure made of composite material .....	91
<b>Kravchenko Yu. S., Iseeva O. A.</b> Design of the structure and interfaces of the conical spacecraft adapter .....	95
<b>Likhachev A. N.</b> Investigation of reversible transformable structures with controlled morphology based on elastomeric thermoactive composite materials .....	98
<b>Maksimova K. V., Mochalov V. V., Morozov N. V., Golovenkin E. N.</b> Calculation of passive intermodulation products of transceiver antennas and feeds .....	101
<b>Moiseev P. P., Viktorov A. I., Smirnov V. A., Nechushkin I. I.</b> Compression tear-off electrical connectors without preliminary disconnecting devices for separated spacecraft structures .....	104
<b>Moiseev P. P., Viktorov A. I., Sidorov A. M., Zenkin E. A.</b> Control system for the deployment of a large transformable antenna .....	106
<b>Nevzorov A. D., Sleptsov P. E.</b> Reflectors with flexible ribs .....	108
<b>Orlov A. S., Orlov S. A., Pasko A. V.</b> On testing the large spatial structures for high intensity impact .....	111
<b>Perevozchikova V. V., Bashkov I. V.</b> Research of the weight loss of cfrp in vacuum .....	113
<b>Rakitin N. V., Borisov R. N., Kozhokar E. P.</b> Use of means to control the spacecraft's own external atmosphere .....	115
<b>Rozhkova E. A.</b> Analysis of the development of autonomous control systems for the transformation of large structures in space vehicles .....	118
<b>Sabirov R. A., Fisenko E. N.</b> Simulation of weightlessness of a beams suspended on cables .....	121
<b>Sazanakov S. I., Sokolov N. Y., Khvalko A. A.</b> Microporous metal for heat pipe by additive technology .....	124
<b>Seryakov A. V., Konkina A. V., Alekseev Andr. P.</b> Swirling vapour flows in the short linear heat pipes .....	127
<b>Setsko I. M., Vnukov A. A.</b> Assessment of the possibility of correcting the inclination of a spacecraft in the process of correcting eccentricity using the spitzer scheme .....	130
<b>Sleptsov P. E., Kisanov Yu. A., Tserikhov V. I., Matrosova I. V., Chalova Yu. A.</b> Ribbon joint and their application in the designs of transformable reflectors .....	132
<b>Steblickaya I. V., Zaharevich N. B., Ivanchenko E. A., Klepikov A. G.</b> Organising the workplace for assembling pyrotechnic product using lean production principles .....	135
<b>Teleshun S. Yu., Dvirniy V. V., Hrapunova V. V., Dvirniy G. V., Shevchuk A. A.</b> Features of application of welding technologies in orbital conditions .....	137

<b>Terletskiy G. S., Taygin V. B.</b> Development of a transformable mirror antenna with a flexible membrane reflector .....	140
<b>Timofeev A. N., Timofeev P. A., Lenkovets A. S.</b> On the question of composite materials reinforced with carbon and silicon carbide fibers .....	143
<b>Tonshina A. V., Shalygina T. A., Dudnik A. I., Savenkov A. A.</b> Elastic hinge unit with increased moment of force .....	145

## Section

## “DESIGN, MANUFACTURE AND TESTING OF AIRCRAFT ENGINES”

<b>Akbulatov Je. Sh., Nazarov V. P., Shhelkanov A. N., Koval R. V., Gerasimov E. V.</b> Development and implementation of innovative additive technologies for printing low thrust rocket engines .....	149
<b>Alekseenko V. V., Nazarov V. P.</b> Determination of hydraulic resistance in the cooling path of the solid propellant motor in the SOLIDWORKS Flow Simulation software module .....	152
<b>Goryachkin E. S., Kudryashov I. A., Zubanov V. M., Shcherban A. I.</b> Analysis of the effect of the configuration of the hub cavities of shrouded guide vane on the parameters of an axial multistage compressor .....	155
<b>Danilov N. A., Falkova E. V., Arngold A. A., Manokhina E. S.</b> Integral model of temperature and dynamic boundary layer distribution for combustion products in rotation cavities of gas turbines of ZHD .....	158
<b>Danilov N. A.</b> Peculiarities of flow in the interblade rope of turbomachines .....	161
<b>Danilov N. A., Arngold A. A.</b> Physical formulation of the problem of determining the value and head deviation of a centrifugal pump .....	163
<b>Zhuikov D. A.</b> Prototyping of a simulation model of the experimental stand of TNA LPRE .....	166
<b>Zhuravlev V. Yu., Titenkov S. V.</b> On the issue of ensuring the accuracy of the dimensions of the resulting pipe trajectory on a pipe bending machine .....	169
<b>Zubanov V. M., Melnikov S. A., Kharitonova A. A., Liu Xin</b> Assessment of the trailing edge simplification influence of the nozzle vanes on on turbine blade flowing capacity .....	172
<b>Kiryushkin G. A., Nazarov V. P.</b> Determination of the temperature gradient in the LTRE chamber cavities by numerical simulation .....	175
<b>Kudryashov I. A., Goryachkin E. S., Melnikov S. A., Kharitonova A. A., Gataullina E. D.</b> Analysis of the effect of deformation flow path of axial compressor on it performance parameters .....	178
<b>Klimovskiy D. A., Zhuravlev V. Yu.</b> Updated model for plactic deformation zone of metal fuel tank separator .....	181
<b>Kudryashov I. A., Goryachkin E. S., Popov G. M.</b> Analysis of the effect of deformation of axial turbine flow path on their performance parameters .....	184
<b>Manokhina E. S., Shinkarev M. A.</b> Evaluation of the reliability of low-thrust rocket engines based on the results of mechanical tests .....	187
<b>Melnikov S. A., Zubanov V. M., Kharitonova A. A., Shcherban A. I.</b> Simulation of the temperature state of the turbine working blade and finishing of its film cooling .....	190
<b>Nazarov V. P., Moiseev V. A., Piunov V. Yu.</b> Innovative design solutions and advanced technologies for the production of liquid rocket engines developed under the leadership of A. M. Isaev .....	193
<b>Novikova Yu. D., Proshletsov A. D., Argumbaev A. S.</b> Selection of a torque sensor for a small-sized gas turbine installation .....	196
<b>Pavlov V. F., Sazanov V. P., Vakulyuk V. S., Semyonova O. Yu., Morozov A. Yu.</b> A study of the influence of residual stresses on the endurance limit of parts with stress concentrators .....	199

<b>Panasenko V. Y.</b> Methods for investigating the operation of models of gas single-stage axial turbines of the LRE .....	202
<b>Pelevin V. S., Aleksentsev A. A., Blinov A. D.</b> Studying the design, spraying and feasibility of using gas foil bearing for a small-size gas turbine engine .....	205
<b>Rutkovskaya M. A., Rutkovskiy V. O.</b> Prospects for use of two-stage three-cylinder radial piston engines for UAV .....	207
<b>Talay E. P., Britkov A. P.</b> Modeling of the nozzle profile of a low-thrust liquid rocket engine using computer-aided design tools of the CATIA V5 CAD package .....	210
<b>Tatychev V. A.</b> The use of the numerical modeling method for solving hydrodynamic problems in the cavities of TNA elements .....	213
<b>Chizhov A. A.</b> Methane-oxygen propulsion engine for ultralight launch vehicle .....	216
<b>Shesternya V. I., Kiryushkin G. A., Golikovskaya K. F.</b> Prospects of thrust vector control .....	218
<b>Shesternya V. I.</b> Comparative analysis of cooling calculation methods of LTRE manufactured using 3D-printing technology .....	220
<b>Shesternya V. I.</b> Numerical simulation of a rocket engine chamber cooling system for manufacturing by SLM-printing method .....	223

Section

**“HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES IN AIRCRAFT, POWER STATIONS  
AND LIFE SUPPORT SYSTEMS”**

<b>Bulov A. O.</b> Intensification of the heat exchange process by applying internal grooves to the heat exchange surface .....	227
<b>Isachenko A. A., Zakharova N. V.</b> Automated heat engineering control at water pumping stations for centralized heat supply systems .....	230
<b>Nastavnikova S. V.</b> Heat recovery of technological gases produced during aluminum production .....	233
<b>Nastavnikova S. V.</b> Freon technologies in power plants .....	236
<b>Oleneva A. D.</b> Design of a thermal control system for a high-power power plant .....	239
<b>Shevchenko Yu. N., Delkov A. V., Melkozerov M. G., Kishkin A. A., Abdullaev M. U.</b> Assessment of the geometry of the inlet into the runner wheel of a low speed radial microturbine .....	242
<b>Shilkin O. V., Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Delkov A. V.</b> Possible design options for two-phase thermal control systems of a spacecar .....	245
<b>Shilkin O. V., Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Delkov A. V., Abdullayev M. U.</b> Overview of existing variants of two-phase spacecraft temperature control systems .....	248

Section

**“ROCKET TECHNOLOGY”**

<b>Arngold A. A., Zuev A. A.</b> Features of the flow with heat exchange in the initial sections channels of the flow parts of the turbopump unit of the liquid rocket engine .....	251
<b>Begishev A. M.</b> Determination of the optimal initial conditions of drain in the process of calibration of flow sensors on the fire stand .....	254
<b>Bredikhin S. G., Blinkov E. V., Samoshkin V. M.</b> Resource use of the material part of pressure accumulator .....	257

<b>Vlasenko A. V., Kosyreva A. I.</b> Application of neural networks in the manufacturing process of rocket and space equipment .....	259
<b>Zhezhera S. A.</b> Experimental approbation of a way of program correction of an elastic backlash in tracking system on the residual to thickness of a cloth .....	262
<b>Lenkovets A. S., Elaev A. A., Khvostov R. E., Mitrofanov A. L.</b> Promising metallic composite materials for application in rocket and space technology .....	266
<b>Matskiv A. A.</b> Development of a methodology and software for carrying out a compensation calculation of cylindrical and spherical wafer shells manufactured by mechanical milling .....	268
<b>Pervova I. N.</b> Technological features of rotation extrusion of large-sized spherical rocket body elements from aluminum alloy 01570 M .....	271
<b>Savchin D. A.</b> Mathematical modeling of liquid-propellant rocket engine pump testing process .....	274
<b>Skomorokha A. V., Yakovlev A. V.</b> Development and implementation of high-performance steel processing technology on CNC machines .....	277
<b>Smirnov A. N., Shilov V. P.</b> Application of multilayer solid lubricant coatings in tribo-conjugations .....	280
<b>Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu.</b> Algorithm for developing a control program for bending pipes on a pipe bending machine .....	283
<b>Udod L. S., Miliyitin A. E.</b> Research of factors affecting the loading capacity of inserts in honeycomb structures .....	286
<b>Shvaleva N. A., Fadeev A. A.</b> Prospects for application of pulsed voltage for electrochemical machining of thin-walled parts .....	289

*Section*

**“CONTROL SYSTEMS, SPACE NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS”**

<b>Alilekova K. S.</b> Environmental impact on signals in space navigation and communications .....	293
<b>Alilekova K. S.</b> Satellite navigation systems: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou and their application in space navigation .....	295
<b>Gaipov K. E., Kozlovsky M. S., Antonov V. M.</b> Analytical algorithm for determining the overlapping area of multiple satellite coverage zones .....	297
<b>Golubev E. N.</b> On-board computer integrated diagnostics for JSC «ISS – Reshetnev Company» satellites .....	300
<b>Grinberg G. M., Sidorov V. G.</b> The concept of a smart scientific and educational laboratory for practical radio editing at the university .....	304
<b>Gushchin I. O., Baranov M. E.</b> Resource degradation of solar panels .....	307
<b>Gushchin I. O., Kharlashina S. V.</b> Principles of arc extinction of a circuit breaker .....	309
<b>Ivanov M. E.</b> Correction of transient processes of automatic control systems using neural networks .....	311
<b>Ivanov M. E.</b> Application of neural networks in simulation of mathematical control systems .....	313
<b>Krashennnikova O. V., Sidorov V. G.</b> Prospects for the development of small spacecraft .....	315
<b>Mineev S. A., Fidelman V. R., Vaks V. L.</b> Organization of an inter-satellite communication channel in the terahertz frequency range .....	318
<b>Musina A. V.</b> Small satellite orientation control systems .....	321
<b>Nazarov I. V.</b> Automatic recognition of space objects using machine vision .....	323
<b>Nazarov I. V., Smirnov A. V., Oreshenko T. G.</b> Monitoring of the stress-strain state of structures using nanomodified composite materials .....	326

<b>Nazarov I. V.</b> Artificial intelligence and machine vision in unmanned vehicles for space exploration .....	328
<b>Plykin K. R., Valikhanov M. M., Vereshagin A. N., Pustoshilov A. S., Lubkin I. A.</b> Investigation of almanac reception time during glonass orbital groups degradation with an algorithm for line distribution in psedoframes in new signals .....	331
<b>Timofeev V. R., Oreshenko T. G.</b> Algorithmic control of the movement of walking unmanned vehicles .....	334
<b>Shpiger N. V., Belkov S. L., Gaipov K. E.</b> Algorithm for creating an imitation model of satellite clustering in GPSS program .....	336

*Section*

**“SPACE AND SPECIAL-PURPOSE ELECTRONIC INSTRUMENT ENGINEERING”**

<b>Gebgardt V. A., Klenkin A. Y.</b> Ensuring of electric power supply circuits protection against over current flows on s/c board .....	339
<b>Kupriashov A. V., Telegin S. V., Pronin A. V., Shestakov I. Y.</b> The use of zinc oxide as a filler for protective coatings of electronic devices for aerospace technology .....	341
<b>Spirina D. A., Patraev E. V., Trifonov I. V.</b> Methods and means of protection against cosmic radiation .....	343
<b>Timosheva A. Yu., Zherdev N. A., Kovalev D. A., Rudenko M. S.</b> Comparative analysis of model rockets onboard electronics based on Arduino and RaCEboard platforms .....	345
<b>Trifanov V. I., Spirina D. A., Trifanov I. V.</b> Features of construction of magnetic protection against cosmic radiation .....	348

*Section*

**“ELECTRONIC COMPONENT BASE OF SPACE SYSTEMS”**

<b>Golovanov S. M., Orlov V. I., Fedosov V. V.</b> The use of cluster analysis methods in the technological process of forming electronic components for space application .....	351
<b>Egorov N. M., Levitskiy A. A., Sitnikov A. M.</b> Experimental study of the drift velocity of charge carriers in gallium arsenide structures in strong electric fields .....	355
<b>Polyakov D. I., Levitskiy A. A.</b> On the matching of filters on surface acoustic waves and the calculation of the capacitance of an interdigital transducer .....	358
<b>Fadeev V. O., Marinushkin P. S.</b> Computer-aided design saw filters in MATLAB .....	361
<b>Sheveleva A. A., Marinushkin P. S.</b> Parameter extraction for the bipolar transistor compact models .....	364

*Section*

**“CONTROL AND TESTING OF AEROSPACE EQUIPMENT”**

<b>Evtifyev M. D.</b> Analysis of ground-based experimental development the Buran orbiter .....	368
<b>Krashennnikova O. V.</b> The problem of obtaining reliable characteristics during tests for rocket and space technology .....	371
<b>Mitrofanova A. N., Zirnova E. A.</b> Control of metrological characteristics during certification of heat and cold chambers .....	374

<b>Murodov G. A., Muminov A. A.</b> Test chamber for small-sized aircraft products .....	376
<b>Orlov A. S., Orlov S. A., Pasko A. V.</b> High intensity impact test fixture to test the spacecraft instruments and hardware .....	379
<b>Saltykov V. A., Iumanov A. K., Poznyak D. R., Golovanskih O. I.</b> Analysis of the results of testing the launching installation and ways for its improvement .....	381
<b>Yurtaev E. V., Shevchuk A. A., Pastushenko O. V., Dvirniy V. V., Dvirniy G. V.</b> Method for simulating the conditions of external heat exchange of spacecraft in a thermal vacuum chamber .....	384

*Section*

**“SMALL SPACECRAFT: MANUFACTURE, EXPLOITATION AND CONTROL”**

<b>Velikanov D. D.</b> Possibility of using the formation of small spacecraft for scientific experiments .....	388
<b>Kadochnikov D. M., Kadadova A. V., Utkin V. V.</b> Optical communication for small spacecraft .....	391
<b>Kombaev T. S., Artimov M. E.</b> Development trends of CubeSat spacecraft for deep space exploration .....	394
<b>Kustov N. D.</b> Network stack in the low-speed technological inter-satellite network concept .....	397
<b>Lapukhin E. G., Potugina D. A., Lapukhin T. E.</b> S-band ground segment for ReshUCube-2 .....	400
<b>Lukyanov M. M.</b> Ballistic forecast of the ReshUCube-2 small satellite .....	402
<b>Morina Z. V.</b> Dynamics of angular motion of spacecraft with dissipative damper .....	405
<b>Chernikov P. S., Khamidullina N. M., Zefirov I. V.</b> Analysis of the impact of space ionizing radiation on integrated circuits of CubeSat format platforms .....	408
<b>Shimova O. E., Zuev D. M.</b> Organization of operation of the ReshUCube-1 satellite .....	411

*Section*

**“USAGE OF EARTH’S REMOTE-SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND MODELLING”**

<b>Babiy I. A.</b> Estimation of forest aboveground biomass in southern Siberia based on Sentinel-1 and PALSAR-2 radar data .....	415
<b>Bakhtina A. V.</b> Testing hypotheses about the independence of spectral features of remote sensing data of anthropogenic territory .....	418
<b>Goncharov A. E., Goncharova E. E.</b> Sidescan sonar gnss positioning and navigating: an overview .....	421
<b>Im S. T., Lee V. G.</b> Spatial regression analysis of the vegetation cover dynamics in Khakassia .....	424
<b>Im S. T., Lee V. G.</b> Development of a tool for generation of cloudless composites from MODIS images in ESRI ArcGIS .....	427
<b>Lapko A. V., Lapko V. A., Tuboltsev V. P.</b> Methodology for aggregation of the results of automatic classification of statistical data .....	430
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Estimation of numerical characteristics of the random variable distribution law based on large volume data .....	433
<b>Tuboltsev V. P.</b> Dynamics of evapotranspiration of evergreen coniferous forests of the Krasnoyarsk territory .....	436
<b>Tuboltsev V. P.</b> Determination of evapotranspiration based on remote sensing data .....	439
<b>Yuronen Yu. P., Nasyrov I. R., Ushakov V. A.</b> Temperature changes in the water surface of the north pacific ocean in the period from 2005 to 2021 according to remote sensing data of the earth .....	442

Section

“EXPLOITATION AND RELIABILITY OF AIRCRAFT”

<b>Avramchikov V. M., Verkhoturov K. I., Ponomarev V. A.</b> Financial assistance packages for banks in the Russian transport industry on the example of utair airlines .....	447
<b>Achkasova E. A., Semichev A. A., Boyko O. G.</b> Analysis of replacement of airport transport with internal combustion engines by electric vehicles .....	450
<b>Elizareva M. G., Shatnykh K. P.</b> Features of uav operation at low altitude and fine sprayu .....	454
<b>Elizareva M. G., Badygov V. F.</b> Magnetic field measurement using reed sensor .....	457
<b>Elizareva M. G., Badygov V. F.</b> Comparison of Hall effect and reed sensors when measurement of magnetic field .....	460
<b>Kormilchik A. N., Musonov V. M.</b> Increasing the operational and technical characteristics of the aircraft radio altimeter .....	463
<b>Maksimova V. V., Boiko O. G., Kaus A. V., Murtazin I. M.</b> Automated forecasting system and prevention of aircraft accidents .....	466
<b>Muminov A. A., Murodov G. A.</b> Predicting oil temperature in IDG using a recurrent neural network with an LSTM layer .....	469
<b>Murtazin I. M., Kaus A. V., Maksimova V. V., Boyko O. G.</b> Study of problems of aviation technical support of foreign aviation equipment and ways of their solution .....	472
<b>Nartov E. A.</b> Modern problems of practical training aircraft maintenance students vessels using virtual laboratory complexes .....	475
<b>Siakov E. E., Siakov V. E., Achkasova E. A., Boyko O. G.</b> Analysis of the prospects of using the Tu-214 aircraft .....	478

Section

“TECHNOLOGY AND MECHATRONICS IN MACHINE BUILDING”

<b>Abramov N. A., Mikhailov I. R., Dolmatov S. N.</b> Determination of boiling temperature of automobile antifreeze .....	481
<b>Agafonov M. A., Kondakov I. S., Pelymskaya A. A., Ruchkin L. V.</b> Analysing the production methods of composite fabric for space and aviation industry .....	484
<b>Anisimova K. G., Shangina E. A., Strizhak D. V.</b> Milling optimization in normal to curve surface strategy for spacecraft parts .....	487
<b>Artemyev A. A., Gaiduk A. S., Iskrov N. S., Sidun N. A.</b> Methods for diagnosing the condition of a lithium-ion battery .....	491
<b>Binchurov A. S., Usevich N. I., Gordeev Y. I., Melchukov K. A., Filippov S. V.</b> Study of the processes of formation of micro-dimensions on the surfaces of parts during milling .....	493
<b>Verveyko D. S., Myrygin A. V., Zlobin S. K., Gusev V. U., Zaitsev R. V.</b> Mathematical modeling of laser welding of a billet of a flexible waveguide section of a spacecraft .....	496
<b>Gaiduk A. S., Artemyev A. A., Iskrov N. S., Sidun N. A.</b> Diagnostic parameters for detecting lithium-ion battery malfunction .....	498
<b>Geraskina M. E., Bakach V. A.</b> Production of a board made of fiberglass coated with foil film .....	500
<b>Grishin A. A.</b> Method of analytical calculation of the stress-strain state of contact rings of current-collecting devices .....	503

<b>Evseev F. D.</b> Development of technology for manufacturing waveguides with molded corners using low-temperature soldering on silver coating .....	506
<b>Evseev F. D., Udod L. S.</b> Development of a method for manufacturing cast waveguide flanges with surface improvement using anaerobic adhesion composition .....	508
<b>Zyrjanov E. Y., Smirnov P. N., Smirnov N. A.</b> Formalization of the inertia center position control of a bodies system in the technological process of special purpose devices assembly .....	510
<b>Ivanov P. A., Levko V. A.</b> Analysis of the topography of the inner surface of a curved billet obtained by selective laser melting before and after abrasive flow macshining .....	512
<b>Iskrov N. S., Artemiev A. A., Gaiduk A. C., Sidun N. A.</b> Maintaining the temperature of lithium-ion battery packs .....	515
<b>Kargapoltsev S. K., Bolshakov R. S.</b> Express method for determining residual stress in aluminum alloy billets .....	518
<b>Klimov S. A., Noskov F. M.</b> Investigation of the microstructure and phase composition of carbide steel obtained by induction surfacing .....	521
<b>Kondakov I. S., Agafonov M. A., Pelymskaya A. A., Shinko A. E.</b> Automation device for the production of large-sized carbon fiber products .....	524
<b>Krivolutsky S. A., Oreshenko T. G., Kulagina S. I.</b> Improving the technology of fdm printing with plastics from various manufacturers .....	526
<b>Luzanov O. R., Snezhko A. A., Kuznetsov V. V.</b> Technological aspects of waam when forming a welded roller .....	528
<b>Moruzhko A. V., Terentyev N. A., Kontserenko A. A., Zhukov M. P., Lopatina E. S.</b> Influence of various modifiers on the grain size of aluminum and its alloys .....	531
<b>Pelymskaya A. A., Kondakov I. S., Agafonov M. A., Shinko A. E., Ruchkin L. V.</b> The use of portal manipulators in the manufacture of rocket parts .....	534
<b>Prichina A. S., Tyurin K. S., Skripka A. V., Sysoyeva L. P., Ramenskaya E. V.</b> Algorithm for developing control programs for the manufacture of end mills .....	536
<b>Timofeev V. V., Trifanov I. V., Patraev E. V.</b> Calculation of the pressure required for corrugation of the waveguide .....	539
<b>Timofeev V. V., Trifanov I. V., Malyshev D. O.</b> Calculation of forces arising during the technological process of twisting waveguides .....	542
<b>Tyurin K. S., Prichina A. S., Sysoeva L. P., Yankovskaya N. F., Ramenskaya E. V.</b> Tool configurator for end mill design .....	545
<b>Hafizov A. R.</b> Development and manufacture of vibro-vacuum installation .....	548

## Section

## “MECHANICS OF SPECIAL SYSTEMS”

<b>Bayandina M. M., Kustov A. V.</b> The main hydrodynamic dependences for determining the hydraulic resistance of vortex contact devices of distillation columns .....	552
<b>Galiev A. R., Esina P. A., Kornev V. M.</b> The main problems arising in the process of satellite guidance .....	555
<b>Esina P. A., Galiev A. R., Kornev V. M.</b> Gravitational stabilization devices in the design of a small spacecraft .....	557
<b>Kustov A. V., Bayandina M. M.</b> The influence of inertia forces on the diameter of the vapor bubble during rectification .....	560
<b>Mezhov V. G., Brangin D. Y., Prikhodko A. S.</b> Designing shafts of industrial equipment with cad elements .....	563

<b>Nepomnyashchy V. S., Artisheva N. A.</b> Modernization of the stand for checking the brake system .....	566
<b>Pashkovsky A. V.</b> Mechanical hysteresis during transverse bending of an elastic rod taking into account compressibility .....	568
<b>Rozhkova E. A.</b> Investigation of mechanical vibrations and their control in spacecraft structures .....	570
<b>Skorobogatov K. A., Sheremetyev N. S., Artisheva N. A.</b> Analysis of the efficiency and safety of the lifting drum .....	573
<b>Soboleva A. A., Dolmatov S. N., Artisheva N. A.</b> The use of a friction clutch in order to reduce peak loads on the drive of the drying drum .....	576
<b>Sukhanova O. A., Trifanov I. V.</b> Combined method of lubrication of worm gearboxes .....	580

*Section*

**“NANOMATERIALS, NANOTECHNOLOGIES AND INFORMATION SYSTEMS  
IN AEROSPACE INDUSTRY”**

<b>Eromasov R. G., Vasilyeva M. N., Simonova N. S.</b> Effect modification with aluminum oxide nanofibers on the properties of cordierite refractory ceramics .....	583
<b>Kazina M. I., Gritsenko E. M.</b> Computer simulation of nanorobots: the future of spacecar repair .....	585
<b>Karpov E. S.</b> Experimental study of geometric-nonlinear bending of thin composite and homogeneous rods .....	588
<b>Koshelev A. A., Yakovlev I. A., Varnakov S. N.</b> Investigation of the epitaxial growth processes of germanium on the Fe <sub>3</sub> Si/Si(111) surface .....	591
<b>Podshibyakina E. Yu., Shimansky A. F., Vasilyeva M. N., Yuriev P. O., Gorodishcheva A. N.</b> Influence of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers modified on the properties of fused quartz ceramics .....	594
<b>Polukchu K. E., Korepanov L. E.</b> Application of additive technologies in the aerospace industry .....	596
<b>Runov R. V., Gelgorn A. V.</b> Relaxation time and impedance in Sm <sub>x</sub> Mn <sub>1-x</sub> S semiconductors .....	599
<b>Semenukha O. V., Voronina S. Yu., Fesik S. A.</b> Possibility of applying strain-sensitive nanocomposite for monitoring the state of transformable structures .....	601
<b>Teplinskaia A. S., Fedorov A. S.</b> Theoretical study of dielectric permittivity of metal nanofilms in a wide frequency range .....	604
<b>Kharkov A. M., Sitnikov M. N.</b> The nernst-ettingshausen effect in nonstichiometric manganese sulfide .....	607
<b>Cheremnykh N. A., Nikitinsky O. S.</b> Dielectric susceptiveness in manganese sulphide with rare earth substitution .....	610

*Section*

**“CONTINUUM MECHANICS  
(Gasdynamics, hydrodynamics, theory of elasticity and theory of plasticity, rheology)”**

<b>Belolipetskii V. M., Genova S. N.</b> Numerical algorithm for investigating annual permafrost dynamics in swamp-lake landscapes .....	614
<b>Vasil'ev E. N.</b> Calculation of frost formation dynamics on flat surface in contact with humid air flow .....	617
<b>Vasil'ev E. N.</b> On the choice of mathematical model for description of ice cover dynamics .....	620

<b>Vyatkin A. V., Kuchunova E. V.</b> Conservative semi-lagrangian algorithm for two-dimensional continuity equation constructed on nonuniform grid .....	623
<b>Dekterev A. A., Sentyabov A. V., Dekterev D. A., Vavilov D. V., Dekterev Ar. A.</b> Study of the aerodynamics of an aircraft with cycloidal rotors .....	625
<b>Dekterev D. A., Dekterev Ar. A., Vavilov D. V., Platonov D. V., Neobyavlyayushchiy P. A.</b> Complex of laboratory equipment for experimental studies of aerodynamics of model objects .....	628
<b>Evtikhov D. O.</b> Numerical-analytical solution of the Cauchy problem for ideal plasticity .....	630
<b>Orlov M. Yu., Glazyrin V. P., Fazylov T. V.</b> Numerical modeling of the ice block penetration process protected by a thin steel layer .....	633
<b>Rabetskaya O. I., Lopatin A. V.</b> Bucking of compressed orthotropic cylindrical plate with free edge .....	636
<b>Sabirov R. A., Senashov S. I., Gomonova O. V.</b> On modeling of long-welded rails ejection .....	638
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Stress-strain state of an inhomogeneous console .....	641
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> On the solution of the Cauchy problem for elasticity equations in the dynamic case .....	643
<b>Shan'ko Yu. V.</b> On exact generalized functionally invariant solutions of the 2d inhomogeneous acoustics equation .....	646

## Section

## “CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES”

<b>Antishin D. V., Koshkin A. V., Lebedeva D. S., Struchinskaya E. A.</b> Assessment of soil contamination with cellulose esters in the territories of FSUE “PO KHK Yenisei” .....	648
<b>Volkova D. S., Chudin O. S., Verpekin V. V.</b> Synthesis of new POCOP <sup>ph</sup> -type platinum pincer complexes containing unsaturated alcohols .....	650
<b>Golenko E. I., Bobrova A. V., Root E. V.</b> Proof of the structure of (ethane-1,2-diylbis(oxy))bis(ethane-2,1-diyl)bis(2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1h-pyrazol-1-yl)acetate) .....	652
<b>Derzhaeva A. V., Nedorubov A. S., Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V.</b> Effect of lead dioxide on the thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane under non-isothermal conditions .....	655
<b>Dyurba N. P., Vdovina E. R., Ivshina V. V., Gavrilova N. A.</b> Synthesis and structure of 1,6-hexandiammonium bis(1-nitrosophthalen-2-olate) .....	658
<b>Kondrasenko A. A., Korolkova I. V., Zhilin K. P.</b> Extraction of silica from spodumene leaching residue by autoclave digestion method .....	661
<b>Koreshkova D. A., Simakova I. L.</b> Development of “one-pot” synthesis of cooling agent – menthol from citral .....	663
<b>Kositsyna A. S., Koryakova T. M., Safin V. A.</b> Processing of drilling muds by thermolysis .....	665
<b>Kositsyna A. S., Kositeyna S. S., Safin V. A., Buryukin F. A.</b> Analysis of soft cracking products of commercial polyolefins by ir spectroscopy .....	667
<b>Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V., Golubtsova O. A., Derzhaeva A. V.</b> Thermolysis of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane in the presence of titanium dioxide .....	670
<b>Kuchina K. Yu., Polienko T. V., Bobrova A. V., Root E. V.</b> Synthesis of ethyl 2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1h-pyrazol-1-yl)propanoate .....	673
<b>Mironova V. A., Girn A. V.</b> Influence of electrolyte components on the color of MAO coatings of aluminum and titanium alloys .....	676
<b>Nizhibovskaya D. K., Ageev Y. I., Bobrov P. S.</b> Synthesis of pyrimidyl substituted 3-methoxymethyl-5-(p-chlorophenyl)-4-nitrosopyrazole .....	678

<b>Nizhibovskaya D. K., Ageev Y. I., Bobrov P. S.</b> Synthesis of pyrimidyl substituted 3-methoxymethyl-5-( $\gamma$ -pyridinyl)4-nitrosopyrazole .....	681
<b>Olchev D. A., Bobrov P. S., Suboch G. A.</b> Dihydralazine with isonitrosobenzoylacetone cyclocondensation .....	685
<b>Polienko T. V., Kuchina K. Yu., Bobrova A. V., Root E. V.</b> Synthesis of 1,2-bis((3,5-dimethyl-4-nitroso-1h-pyrazole-1-yl)methyl)benzene .....	688
<b>Polyak N. S., Chizhevskaya M. V.</b> Application of membrane electrolysis for cleaning solutions .....	691
<b>Hafizov A. R.</b> Chemical reduction of copper on dielectrics .....	694
<b>Hafizov A. R.</b> Ways to improve electroplating .....	697
<b>Khudoley M. A., Lesik E. I., Venchenko E. P., Volchkova O. G.</b> Development of technology for the production of bitumen-polymer mastic based on secondary polyolefins .....	700
<b>Chizhevskaya M. V.</b> Lithium: overview of production technologies and sales market .....	702
<b>Yunusova P. R., Kukushkin A. A., Ponomarev I. S.</b> Synthesis and study of coordination properties of new beta-diketones and ketoimines based on them .....	705

Section

“TECHNOSPHERE SAFETY”

<b>Anikin M. N, Taseiko O. V.</b> Temporal dynamics of risk factors for hazardous natural phenomena in the Siberian Federal District .....	709
<b>Berdenko N. L., Cherkasova N. G.</b> Monitoring and forecasting of technogenic emergencies in oil and gas fields .....	712
<b>Borisov N. I., Belskaia E. N.</b> Identification of the accidents’ causes at the enterprises of the company “RUSAL” .....	715
<b>Kalimanova L. S., Taseyko O. V.</b> Inhalation non-carcinogenic risks on the basis of evolutionary models for digestive system diseases of the population of Krasnoyarsk .....	718
<b>Kononova A. E., Kryilova O. K.</b> Labor protection management at novoangarsky concentrating plant .....	721
<b>Kuvaev S. Y., Kryilova O. K.</b> Safety of production processes in the timber processing shop of rotex-c ltd. ....	723
<b>Lagno P. V., Cherkasova N. G.</b> Investigation of the properties of silt deposits of treatment facilities in Krasnoyarsk .....	726
<b>Laricheva Yu. S., Belskaia E. N.</b> Study of noise characteristics during the operation of woodworking equipment LLC “Soyuz” .....	729
<b>Makar N. I., Soboleva S. V., Esyakova O. A.</b> Biological method of cleaning soil pollution from petroleum products .....	732
<b>Mozzherin A. V., Paklin N. N., Loginov Y. Y.</b> Computer simulation of the structural defects formation in cadmium telluride .....	735
<b>Nesterova M. G., Zhirnova E. A.</b> Ensuring the safety of operation of the climate chamber .....	737
<b>Panina E. I., Khilyuk A. V.</b> Specifics of the implementation of the company’s safety culture .....	740
<b>Pronin E. E., Stopa D. A., Luneva T. A., Slashchinin D. G., Semenyuk E. Y.</b> The study of pea flour for the basis of cosmopolitan on tripisingibiruyushchy activity .....	742
<b>Saulova T. A.</b> Innovative technology of snow clearing of building roofs – an element of air transport infrastructure safety .....	745
<b>Saulova T. A.</b> Investment advantages pneumatic snow removal technologies for roofs .....	748
<b>Saulova T. A., Makhovskaya I. S.</b> Falls from heights: ways to reduce injuries in the utilities sector .....	751

<b>Sirotenko R. T., Taseiko O. V.</b> Assessment of potential risks of hazardous industries in the Siberian federal district .....	754
<b>Smirnov E. G., Gerasimova L. A.</b> Environmental friendliness of the production and operation of the demonstration stand “Pneumohydraulic system 8K-14” .....	756
<b>Sugak E. V.</b> “Regulatory guillotine” of technosphere safety .....	759
<b>Fedorov M. S., Gerasimova L. A.</b> The impact of the control system operation of the stand for recording the characteristics of solar panels on the environment .....	762
<b>Khilyuk A. V.</b> Dependence of the sorbent polarization on the size of its fraction .....	764
<b>Chagarina E. V., Belskaia E. N.</b> Analysis of wastewater quality at krasnoyarskaya CHPP-1 .....	767

## Section

## “RENEWABLE FEEDSTOCKS COMPLEX PROCESSING”

<b>Abramov N. A., Mikhailov I. R., Dolmatov S. N.</b> Technology for the construction of artificial islands with the use of packages made of wood waste .....	771
<b>Akinina E. V., Duk D. V., Eliseev S. G., Ermolin V. N.</b> Investigation of ways to change the permeability of birch wood .....	774
<b>Arkanova M. E., Yagudina G. Z., Kayukova M. A., Sadaeva A. S., Demidenko N. Y.</b> Influence of component composition of plant substrates on the process of bioconversion by fungi of the genus <i>Pleurotus</i> .....	777
<b>Arkanova M. E., Yagudina G. Z., Kayukova M. A., Sadaeva A. S., Demidenko N. Y.</b> Microbiological prospects for growing fungi on plant substrates .....	780
<b>Barinova N. S., Isaeva E. V.</b> Determination of flavonoids in extracts of poplar leaves of the Krasnoyarsk region .....	783
<b>Bayandin M. A.</b> Organization of investment activities .....	786
<b>Buglaev S. V., Fedoseev N. A., Eskin V. D., Krivorotova A. I.</b> Investigation of the properties of mineral composites based on wood processing waste .....	789
<b>Voinov N. A., Bogatkova A. V., Zemtsov D. A., Chernov V. A.</b> Tray of the diabatic rectification column .....	792
<b>Golushko R. S., Ambrosovich Y. A., Zemtsov D. A.</b> Comparative analysis of hydraulic and pneumatic nozzles .....	795
<b>Ivannikov D. V., Potapenko S. A., Eremlenko O. N., Koch J. A.</b> Prospects for the use of pine nut shells in the production of fermented kvass .....	798
<b>Ivannikov D. V., Potapenko S. A., Eremlenko O. N.</b> The possibility of using coffee cake and pine nut shells in bioconversion processes .....	801
<b>Ivanov Z. A., Baidurov B. A., Vasyuk A. E., Esyakova O. A.</b> Methods of processing composite packaging materials .....	804
<b>Isaeva E. V., Kharchenko A. I., Mamaeva O. O., Serbina L. M.</b> Conversion of coniferous bark by <i>Pleurotus</i> .....	808
<b>Kazitsin S. N., Trimasova O. V.</b> Hygroscopic properties of medium density binderless boards made of mechanically activated wood particles .....	811
<b>Kaplev E. V., Alashkevich Yu. D., Yurtayeva L. V., Patrakov V. A., Ovchinnikov V. S.</b> Investigation of the influence of the design parameters of a knife-less grinding plant on the grinding process .....	814
<b>Karelina A. A., Alashkevich Y. D., Kozhukhov V. A., Khokhlov K. A.</b> Influence of the gap of a disc mill on the quality of paper products .....	817

<b>Kositsyna A. S., Yumashev M. E., Kositcyna S. S.</b> Analysis of soft cracking products of commercial polyolefins by ir spectroscopy .....	820
<b>Krivorotova A. I., Fedoseev N. A., Buglaev S. V., Tyumentseva A. E., Lopatin A. Y.</b> Investigation of the possibility of recycling secondary waste of furniture production .....	822
<b>Kulshmanova N. N., Stepanova E. F., Kukushkin A. A., Storozhenko S. E.</b> Technology for preparation and analysis of rhodiola rosea extract .....	825
<b>Ostryakova V. A.</b> Use of mechanically activated mass as a binder for wood composite production .....	828
<b>Potapenko S. A., Ivannikov D. V., Eremenko O. N., Koch J. A.</b> Kvass on birch juice using vegetable raw .....	830
<b>Rotar E. N., Khudoley M. A., Lesik E. I.</b> Preparation and study of carbon sorbents from vegetable raw materials .....	833
<b>Semilet S. A., Jarovaja V. I., Marchenko R. A., Grankin N. G., Jarovoj S. V.</b> Influence of curvilinear knife settings on papermaking properties of hardwood and softwood pulp milling .....	836
<b>Semin A. V., Ambrosovich Y. A.</b> Overview of open and closed headbox in the pulp and paper industry .....	840
<b>Slepyh D. A., Jarovaja V. I., Marchenko R. A., Eremeev M. O., Jarovoj S. V.</b> Analysis of physical and mechanical indicators of chemical-thermomechanical mass samples .....	843
<b>Smertin N. V.</b> The use of wood as a trend to reduce the carbon footprint .....	845
<b>Tikhonova A. O., Isaeva E. V.</b> Phospholipids of leaf-based feed product .....	847
<b>Tyumentseva A. E., Lopatin A. Y., Eskin V. D., Krivorotova A. I.</b> Analysis of properties of glued materials based on thermally modified veneer .....	850
<b>Fedorov V. S., Ryazanova T. V., Mamaeva O. O.</b> Preparation of cellulose product by organosolvent method from wood waste of common pine <i>Pinus sylvestris</i> .....	853
<b>Khokhlov K. A., Kozhukhov V. A., Alashkevich Y. D., Karelina A. A.</b> The influence of the rotation speed of the disk mill rotor on the physical and mechanical characteristics of paper products .....	856
<b>Chernov V. A., Zemtsov D. A., Deryagina N. V., Voinov N. A.</b> Influence of parcial condensation for turpentine rectification .....	859
<b>Shotov A. A., Matygulina V. N., Chistova N. G.</b> Educing the cost and toxicity of fiberboard due to the use of bark in the wood fiber composition .....	862
<b>Eskin V. D., Lopatin A. Yu., Tyumentseva A. E.</b> Comparative analysis of the properties of wood-bark composites .....	865
<b>Yurtayeva L. V., Slizikova E. A., Kolosova E. R., Pozharkova S. A., Bandura R. V.</b> Types of raw materials for obtaining microcrystalline cellulose .....	868