

# Д Т У ЕШЕТНЕВСКИЕ ТЕНИЯ

ISBN 978-5-86433-924-4



Часть 1  
•  
XXVI

Красноярск • 2022

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 участии

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации  
Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС»

Правительства Красноярского края  
Совета ректоров вузов Красноярского края  
Федерации космонавтики России

АО «ЦКБ «Геофизика»

АО «НПП «Радиосвязь»

ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система»  
Красноярского регионального отделения ООО «Союз машиностроителей России»



# РЕШЕТНЕВСКИЕ ТЕННИЯ

---

*Материалы XXVI Международной научно-практической конференции,  
посвященной памяти генерального конструктора  
ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева  
(09–11 ноября 2022, г. Красноярск)*

В 2 ЧАСТЯХ. ЧАСТЬ 1

Электронное издание

Красноярск 2022

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022

УДК 629.7  
ББК 30 + 2  
Р47

**Редакционная коллегия:**

Ю. Д. АЛАШКЕВИЧ, Е. В. БЕЛЯКОВА, Е. Н. ГОЛОВЕНКИН, В. В. ДВИРНЫЙ, С. П. ЕРЕСКО,  
В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, В. В. ЗОЛОТАРЕВ, Л. А. КАЗАКОВЦЕВ, А. А. КИШКИН, Е. В. КУЗНЕЦОВ,  
В. А. ЛАПКО, В. А. ЛЕВКО, А. Ю. ЛИТВИНЧУК, К. Ю. ЛОБКОВ, М. В. ЛУКЬЯНЕНКО,  
Ю. В. МАКСИМОВ, И. А. МИСИНЕВА, В. М. МИХАЛКИН, А. Е. МИХЕЕВ, Е. А. МОРОЗОВ,  
В. В. МОСКВИЧЕВ, А. В. МУРЫГИН, В. П. НАЗАРОВ, В. И. ОРЛОВ, А. С. ПАРШИН,  
О. Е. ПОДВЕРБНЫХ, Л. В. РУЧКИН, К. В. САФОНОВ, С. И. СЕНАШОВ, А. А. СТУПИНА,  
Г. А. СУБОЧ, О. В. ТАСЕЙКО, М. С. ТОВБИС, М. Н. ФАВОРСКАЯ, В. Х. ХАНОВ

**Под общей редакцией**

доктора физико-математических наук Ю. Ю. ЛОГИНОВА

**Решетневские чтения** [Электронный ресурс] : 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. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 29,6 МБ). – Систем. требования : Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2022. – Ч. 1. – Режим доступа: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-924-4

Сборник содержит материалы XXVI 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 978-5-86433-924-4



9 785864 339244

Подписано к использованию: 08.11.2022. Объем: 29,6 МБ. С 537/22.

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 организаторы, участники, гости!*

Приветствую вас на открытии международной научно-практической конференции «Решетневские чтения». Традиционно на площадках Сибирского государственного университета науки и технологий собираются специалисты предприятий ракетно-космической промышленности, ученые, преподаватели, студенты. Благодаря их открытиям и слаженному взаимодействию ракетно-космическая отрасль России – одна из наукоемких и динамичных.

В истории нашей страны есть немало тому примеров. Совсем недавно мы отметили 65-ю годовщину со Дня начала космической эры. За эти годы технологический потенциал страны в области РКТ возрос многократно. Красноярский машиностроительный завод внес свой значительный вклад в этом направлении. За 90 лет предприятие развилось в мощный высокотехнологичный комплекс по производству продукции как для гражданского космоса, так и для обеспечения обороноспособности государства.

Сегодня Роскосмос и Министерство обороны ставят перед Красмашем новые, более сложные задачи, для выполнения которых необходимо внедрение не только современного уникального оборудования, но и, прежде всего, привлечение высококвалифицированных специалистов, которые могут работать на нем, получив необходимое образование в отраслевых вузах и техникумах.

Поэтому мы в сотрудничестве с нашим давним партнером и организатором «Решетневских чтений» – Сибирским государственным университетом науки и технологий – вернулись к проверенной системе подготовки кадров «завод-втуз». В конце прошлого года вместе с профессорско-преподавательским составом СибГУ начали работу по модернизации образовательных программ с тем, чтобы будущие выпускники максимально соответствовали запросам предприятия и приходили на завод, располагая всеми необходимыми знаниями и практическими навыками.

Предстоящая конференция – это актуальная площадка обмена опытом среди участников и возможность для завода взять на вооружение в производство предлагаемые авторами темы, проекты, исследования.

Традиционно руководители служб и направлений, ведущие специалисты Красмаша входят в составы экспертных комиссий «Решетневских чтений», а секция «Технологии ракетостроения» проводится на нашем предприятии.

Желаю участникам конференции плодотворной работы, авторам докладов – успешной защиты, всем нам новых свершений и открытий во благо развития ракетно-космической промышленности и защиты Отечества.

*Генеральный директор АО «Красмаш»  
Председатель Красноярского регионального  
отделения СоюзМаш России  
А. Ф. ГАВРИЛОВ*



*Уважаемые коллеги!*

**Приветствуем вас на XXVI 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 своя работа 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 26 лет своего существования конференция стала основой для интеграции образования, науки и производства, что способствует развитию науки и техники в современном мире.

*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 «Красноярский  
машиностроительный  
завод»  
А. Ф. Гаврилов*



**Секция**

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

УДК 62–238.9

## СПОСОБ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФИТИНГОВ К СКЛЕИВАНИЮ С ТРУБАМИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В. Е. Ануфриенко, М. В. Волков, И. О. Надеин, А. А. Филиппов\*

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

\*E-mail: filippov-art15@yandex.ru

*Рассмотрены способы повышения прочности и стабильности характеристик клеевых соединений металлических фитингов с трубами из композиционного материала, составляющих основу каркаса батареи солнечной (БС) космического аппарата (КА).*

*Ключевые слова: батарея солнечная, каркас, фитинг, клеевое соединение, рифление, станочное оборудование.*

## A METHOD FOR PREPARING THE SURFACE OF METAL FITTINGS FOR GLUING WITH TUBES MADE OF COMPOSITE MATERIAL

V. E. Anufrienko, M. V. Volkov, I. O. Nadein, A. A. Filippov\*

JSC Academician M. F. Reshetnev Information satellite systems  
52, Lenin Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation, 662972

\*E-mail: filippov-art15@yandex.ru

*The article describes ways of increasing strength and properties stability of glued joints of metal fittings with tubes made of composite material composing the base of frame of spacecraft's solar battery.*

*Keywords: solar battery, frame, fitting, glued joint, corrugation, machining equipment.*

Каркасы современных БС КА состоят из углепластиковых труб и металлических (алюминиевых и титановых) фитингов, соединяющихся между собой при помощи клеевого соединения, конструкция которого представлена на рис. 1 [1].

Перед склеиванием металлические фитинги проходят механическую подготовку согласно ОСТ 92–0949–2013 – зачистку патрубков фитинга при помощи напильника с последующим обезжириванием обработанной поверхности. При помощи зачистки напильником создается рельеф – рифление, которое позволяет повысить механические характеристики клеевого соединения за счет увеличения площади контактирующей с клеем поверхности (рис. 2) [2, 3].

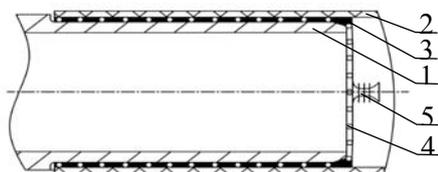


Рис. 1. Конструкция клеевого соединения:  
1 – металлический фитинг; 2 – труба  
из композиционного материала; 3 – эпоксидный  
клей; 4 – армирующий шнур-чулок; 5 – нитки



Рис. 2. Рифление, нанесённое  
напильником

К недостаткам данного способа подготовки, приводящим к снижению стабильности механических характеристик клеевого соединения, можно отнести малую эффективность для высокопрочных мате-

риалов (титановых сплавов), высокую трудоёмкость, высокое влияние человеческого фактора, невозможность контроля рифления.

Для повышения прочностных свойств и уменьшения разброса характеристик клеевого соединения было предложено заменить ручное нанесение рифления напильником на нанесение рифления при помощи станочного оборудования, что позволяет исключить человеческий фактор, обеспечить максимальную повторяемость процесса и контролировать глубину и зоны нанесения рифления [4].

В зависимости от материала и конструкции фитингов определены следующие методы подготовки поверхности патрубков к склеиванию:

- нанесение рифления при помощи накатки (рис. 3);
- нанесение рифления при помощи нарезания винтовых канавок (рис. 4);
- нанесение рифления при помощи фрезерной обработки (рис. 5).



Рис. 3. Рифление, выполненное накаткой



Рис. 4. Рифление, выполненное резанием на токарном станке



Рис. 5. Рифление, выполненное проточками на фрезерном станке

Накатка – наиболее простой метод нанесения рифления при помощи станочного оборудования. Метод позволяет использовать универсальное токарное оборудование, однако при обработке возникают высокие нагрузки деформации, что приводит к высокому износу инструмента и не позволяет эффективно использовать данный метод при обработке твёрдых материалов, например, титана.

Нанесение рифления при помощи токарной обработки позволяет исключить недостатки подготовки накаткой. При токарной обработке возникают значительно меньшие усилия, что позволяет проводить обработку твёрдых материалов. Сущность метода заключается в нарезании при помощи токарного станка винтовых канавок в правую и левую стороны на поверхности патрубка.

Однако, накатка и токарная обработка удобны при обработке фитингов с прямым углом между патрубками. Фрезерная же обработка позволяет провести подготовку фитингов с углом между патрубками, отличным от прямого. Рифление при данном методе подготовки представляет собой кольцевые канавки.

Для проверки прочностных свойств клеевого соединения с фитингами, подготовленными при помощи станочного оборудования, были проведены испытания образцов клеевых соединений «фитинг-труба» на изгиб и растяжение [5]. Результаты испытаний приведены в таблице.

#### Результаты испытаний клеевых соединений «фитинг-труба»

№	Изгиб				Растяжение			
	Ручное рифление		Механическое рифление		Ручное рифление		Механическое рифление	
	Разрушающая нагрузка, Н/м	Характер разрушения	Разрушающая нагрузка, Н/м	Характер разрушения	Разрушающая нагрузка, кН	Характер разрушения	Разрушающая нагрузка, кН	Характер разрушения
ВТ14 (с термоциклированием)								
1	362,6	Клей 85%, УП 15%	710,4	УП 100%	40,00	Клей 50%, УП 50%	83,90	УП 100%
2	436,6	Клей 60%, УП 40%	629,0	УП 100%	23,00	Клей 50%, УП 50%	81,60	УП 100%
АМг6 (с термоциклированием)								
1	185,0	УП 100%	207,2	УП 100%	8,82	УП 100%	16,48	УП 100%
2	177,6	УП 100%	300,7	УП 100%	8,00	УП 100%	14,51	УП 100%

В результате испытаний выявлено, что для титанового сплава прочность клеевого соединения увеличилась в 1,5...2 раза, для алюминиевого сплава – в 1,2 раза. Кроме того, применение станочного оборудования позволяет обеспечить повторяемость параметров рифления (шаг, глубина), исключая человеческий фактор при подготовке, и повысить стабильность механических характеристик.

Таким образом, нанесение рифления с помощью станочного оборудования позволило улучшить механические свойства клеевого соединения.

### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие. Красноярск: СибГАУ, 2011. 488 с.
2. Бакулин В. Н., Гусев Е. Л., Марков В. Г. Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций. В 2 т. Т. 1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 256 с.
3. ОСТ 92–0949–2013 «Клеи. Типовые технологические процессы склеивания материалов».
4. Пат. 2775768 Российская Федерация, МПК В32В7/08. Способ подготовки поверхности металлических фитингов к склеиванию с профилем из композиционного материала / Байбородов А. А., Васильева Т. С., Данилова Ю. С. и др. № 2021115160; заявл. 27.05.2021; опубл. 08.07.2022.
5. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Яровая А. В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 576 с.

### References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsyonnogo obespecheniya: ucheb. posobie* [Fundamentals of design of information support spacecrafts: study guide]. Krasnoyarsk, SibGAU, 2011, 488 p.
2. Bakulin V. N., Gusev E. L., Markov V. G. *Metody optimal'nogo proektirovaniya i rascheta kompozitsionnykh konstruksiy* [Methods of optimal design and calculation of composite structures]. In 2 vol. Vol. 1. *Optimal'noe proektirovanie konstruksiy iz kompozitsionnykh i traditsionnykh materialov* [Optimal design of structures made of composite and conventional materials]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 256 p.
3. OST 92–0949–2013 «*Klei. Tipovye tekhnologicheskie processy skleivaniya materialov*» [«Glues. Typical technological processes of gluing of materials»].
4. Bayborodov A. A., Vasileva T. S., Danilova Yu. S. *Sposob podgotovki poverkhnosti metallicheskih fitingov k skleivaniyu s profilem iz kompozitsionnogo materiala* [A method for preparing the surface of metal fittings for gluing with a profile made of composite material]. Patent RF, no. 2775768, 2021.
5. Gorshkov A. G., Starovoytov E. I., Yarovaya A. V. *Mekhanika sloistykh vyazkouprugoplasticheskikh elementov konstruksii* [Mechanics of layered viscoelastic structural elements]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005, 576 p.

© Ануфриенко В. Е., Волков М. В., Надеин И. О., Филиппов А. А., 2022

УДК 629.7:001.891

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В СИБНИА ИМ. С. А. ЧАПЛЫГИНА

В. Е. Барсук<sup>1</sup>, Д. Н. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. Л. Чемезов<sup>1,2</sup>, С. В. Шейфер<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»

Российская Федерация, 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «НГТУ»

Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

E-mail: smirnovd@sibnia.ru

*Проведен обзор истории создания ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина», приведена информация об основных выполненных институтом работах по исследованию авиационно-космической техники. Рассмотрены текущие направления научно-исследовательских, опытно-конструкторских и экспериментальных работ института. Определены основные перспективные направления деятельности института по развитию научного, научно-технологического и материально-технического потенциала, обеспечивающего его устойчивое и эффективное функционирование и развитие в последующие годы.*

*Ключевые слова: авиационно-космическая техника, научно-исследовательская работа, расчетно-экспериментальные исследования, опытно-конструкторские работы, стендовая база.*

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF AVIATION AND SPACE TECHNOLOGY IN SIBNIA IM. S.A. CHAPLYGIN

V. E. Barsuk<sup>1</sup>, D. N. Smirnov<sup>1,2</sup>, V. L. Chemezov<sup>1,2</sup>, S. V. Sheyfer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Aeronautical Research Institute Named After S. A. Chaplygin, SibNIA

21, Polzunov Str., Novosibirsk, 630052, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, NSTU

20, K. Marksa Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

E-mail: smirnovd@sibnia.ru

*A review of the history of the creation of the Siberian Aeronautical Research Institute Named After S.A. Chaplygin provides information on the main work performed by the institute on the study of aerospace technology. The current directions of research, development and experimental work of the Institute are considered.*

*Keywords: aerospace engineering, research work, computational and experimental research, experimental design work*

Федеральное автономное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина» (ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина») создано в соответствии Постановлением Государственного Комитета Обороны № 513 «О создании второй научно-исследовательской базы авиации на Востоке СССР» от 19 августа 1941 года как филиал № 2 «ЦАГИ имени профессора Н. Е. Жуковского». 9 июля 1946 года Постановлением № 1537-684 Совета Министров СССР преобразован в «Государственный Союзный Сибирский научно-исследовательский институт авиации» [1].

В последующие годы в лабораториях аэродинамики и прочности СибНИА исследованы характеристики более тысячи моделей различных летательных аппаратов, при этом многие исследования носили уникальный характер. Так, в СибНИА были проведены усталостные тепло-прочностные испытания натурного сверхзвукового самолёта Ту-144 и агрегатов воздушно-космического самолёта «Буран». За многолетнюю историю института решен целый ряд расчетно-экспериментальных задач

по авиационно-космической технике, в частности можно отметить следующие наиболее значимые исследования [2]:

- аэродинамики и динамики полёта более 2000 моделей самолётов и экранопланов.
- более 170 летательных аппаратов на статику и ресурс;
- более 180 авиационных агрегатов на отдельных стендах;
- частотные испытания 210 самолётов и вертолетов;
- в аэродинамических трубах более 200 моделей на флаттер, дивергенцию, реверс элеронов;
- 910 агрегатов и фрагментов авиационной и ракетно-космической техники на виброустойчивость и виброакустику;
- около 500 опор шасси на шимми и копровые сбросы.

Стоит отметить, что сегодня СибНИА осуществляет научно-техническую и внедренческую деятельность, направленную на формирование научно-технического задела в области перспективных технологий российского авиа- и ракетостроения, проводит опытно-конструкторские и технологические работы. От имени Российской Федерации права учредителя и собственника имущества института осуществляет ФГБУ «НИЦ «Институт им. Н. Е. Жуковского». В структуре СибНИА 9 научно-исследовательских отделений, лётно-исследовательская база и опытное производство. Система менеджмента качества СибНИА сертифицирована на соответствие международным авиационным стандартам ISO 9001 и AS 9100. При СибНИА создан и аккредитован Авиационным регистром Межгосударственного авиационного комитета и Госстандартом России Испытательный центр (ИЦ СибНИА).

Экспериментальная база института позволяет проводить статические, усталостные и динамические испытания натуральных конструкций летательных аппаратов весом до 500 тонн, агрегатов и фрагментов конструкций, аэродинамические исследования по разработке облика летательных аппаратов, доводке разрабатываемых перспективных ЛА, а также серийно выпускаемых изделий АТ, лётные испытания серийных и опытных ЛА авиационного оборудования. Более 90% экспериментального оборудования включено в Реестр Уникальной стендовой базы ОПК. Среди стендов и оборудования необходимо отметить:

- аэродинамическую трубу Т-203 малых дозвуковых скоростей непрерывного действия с открытой рабочей частью, равномерно регулируемой скоростью потока от 10 до 90 м/с;
- аэродинамическую трубу Т-205М больших дозвуковых, трансзвуковых и сверхзвуковых скоростей непрерывного действия с закрытой рабочей частью, со скоростью потока в трубе, соответствующей числам М от 0,4 до 2,0;
- 3 испытательных корпуса-стенда для натуральных испытаний авиационной, ракетной и космической техники общей площадью 15 400 м<sup>2</sup>, высотой более 30 м, в том числе корпус-стенд с уникальным силовым потолком площадью 6 400 м<sup>2</sup>;
- комплекс стендов для испытаний взлётно-посадочных устройств летательных аппаратов с посадочным весом от 0,1 до 500 т (6 копров, позволяющих воспроизводить нагрузки от 0,075 до 150 т);
- комплекс электрогидравлических испытательных машин двустороннего действия с воспроизводимым усилием до 1000 т для статических и усталостных испытаний конструкционных материалов и элементов авиационных конструкций с учётом влияния конструктивно-технологических факторов и эксплуатационно-климатических воздействий;
- стенд динамического моделирования и исследования аэроупругости, комплекс частотных испытаний;
- климатические камеры тепла и влажности;
- летающие лаборатории на базе Ан-2, Л-29, Як-40, Ту-134, Ми-8Т, оснащённые современными информационно-измерительными комплексами, позволяющими выполнять исследование внешних воздействий и нагрузок, действующих на летательный аппарат в типовом полёте, исследование усталостной долговечности элементов авиаконструкций, проводить испытания радиосветотехнических систем обеспечения полётов и решать другие прикладные задачи.

В современных условиях основными приоритетными направлениями деятельности СибНИА являются:

- обеспечение отечественной авиакосмической промышленности опережающим научно-техническим заделом, в т. ч. результатами прикладных научно-технологических исследований для разработки перспективных образцов авиационной и ракетно-космической техники, а также отработки инновационных технологий и ускорения процесса их внедрения в серийное производство;

– формирование единой промышленно-технологической платформы по разработке, производству и испытаниям перспективных образцов авиационной техники гражданского и военного назначения, интенсификации внедрения в серийное производство достижений авиационной науки;

– создание и развитие промышленных критических и базовых технологий, обеспечивающих проектирование и производство перспективных изделий авиационной техники (гражданского и военного назначения), а также изделий смежных отраслей промышленности, соответствующих мировому уровню 2020–2025-х годов;

– формирование новых научно-технических направлений прикладных исследований и разработки авиационной техники, в т. ч. процессов реинжиниринга и модификации существующих образцов серийных воздушных судов;

– консолидация российского и зарубежного опыта и трансфера инновационных технологий, обеспечивающих расширение научно-производственной деятельности предприятия, а также системную интеграцию в интересах разработки конкурентоспособной авиационной техники;

– совершенствование нормативно-правового и нормативно-технического регулирования в области исследований, разработки и производства авиационной техники гражданского, военного и специального назначения;

– разработка и реализация учебных планов и образовательных программ для подготовки и переподготовки профильных специалистов инженерного, научного состава, профессиональных рабочих и управленческих кадров, привлечение и закрепление на предприятии перспективных молодых специалистов и ученых.

Стоит подчеркнуть, что ключевой особенностью и преимуществом СибНИА сегодня является современное наличие в структуре подразделений, выполняющих работы в области аэродинамики и динамики полёта, прочности и ресурса авиационных конструкций, проектирования и изготовления демонстраторов перспективной авиационной техники, лётных испытаний различных типов летательных аппаратов. На территории от Урала до Камчатки СибНИА является одним из основных многопрофильных авиационных центров, оснащённым современным оборудованием и располагающим квалифицированными кадрами, способными решать многие практические задачи в области разработки, создания и испытаний, а также сопровождения эксплуатации, ремонта и продления ресурса ЛА, при этом научный авторитет исследований СибНИА признан всеми самолётостроительными фирмами России, а также зарубежными партнёрами.

Стратегия развития СибНИА на период до 2030 года предполагает проведение научных исследований и выполнение опытно-конструкторских работ, отвечающих стратегическим потребностям аэрокосмической отрасли. Имеющийся опыт, наличие уникального оборудования и высококвалифицированные научные кадры – всё это позволяет утверждать, что любая задача в области авиационно-космической техники может быть решена коллективом СибНИА, который и впредь будет оставаться надёжным партнёром ОКБ, НИИ и заводов авиационно-космического профиля.

### **Библиографические ссылки**

1. Создание, деятельность и перспективные планы развития СибНИА // Полёт. М.: Машиностроение-Полет, 2022. № 2. С. 3-12.

2. Основные направления научно-экспериментальных работ СибНИА в 1941-2021 гг. // под ред. А.Н. Серьезнова, В.Л. Чemezova. Новосибирск: СибНИА, 2021.

© Barsuk V. E., Smirnov D. N., Chemezov V. L., Sheyfer S. V., 2022

УДК 621.45.046.2:532.528

## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАВИТАЦИИ В ЗАБОРНОМ УСТРОЙСТВЕ

В. А. Бордачев, Е. А. Рожкова, 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: vladimir27032001@mail.ru

*Рассмотрены возможные причины появления кавитации в топливных магистралях ракеты-носителя. Проведен анализ возможности её появления в процессе полета. Составлена зависимость диаметра топливной магистрали от давления в трубках для бескавитационного проектирования трубопровода. Представлены рекомендации для предотвращения кавитации.*

*Ключевые слова: кавитация, поток жидкости, давление, скорость, топливный бак.*

## PREVENTION OF CAVITATION IN THE INTAKE DEVICE

V. A. Bordachev, E. A. Rozhkova, V. V. Kolga

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

*The possible causes of cavitation in the fuel lines of the launch vehicle are considered. The analysis of the possibility of its appearance during the flight is carried out. The dependence of the diameter of the fuel line on the pressure in the tubes for cavitation-free pipeline design has been compiled. Recommendations for preventing cavitation are presented.*

*Keywords: cavitation, liquid, pressure, speed, fuel tank cavitation, fluid flow, pressure, velocity, fuel tank.*

При работе двигательных установок есть вероятность выхода из строя его узлов и агрегатов за счет возникновения кавитации. Когда при движении жидкости скорость потока увеличивается, это может привести к снижению статического давления в магистрали, что в свою очередь вызовет кавитацию, которая наступает, когда статическое давление становится ниже давления насыщенных паров жидкости. Такое явление может наблюдаться в гидротурбинах, насосах, агрегатах автоматики и магистралях питания и может привести к гидроудару. Такой процесс может быть инициализирован, когда происходит прорыв газа в сливной трубопровод. Высота уровня жидкости  $H_{кр}$ , при которой происходит прорыв газа, называется критическим уровнем или критической высотой [1].

Последствиями кавитации является разрушение или нарушение работы баков и корпуса, а также турбин насосов и элементов других гидравлических устройств, которое вызывается микроскопическими гидроударами вследствие быстрой конденсации кавитации пузырьков, падающих с потоком жидкости в область повышенного давления [2].

Возникновение кавитации (рис. 1) можно приближенно рассчитывать исходя из уравнения Бернулли (1) для сечений А-А (сечение в баке) и В-В (место соединения заборного устройства с топливной магистралью).

$$\rho * a_X * h + p_A + \frac{\rho * w_A^2}{2} = \rho * a_X * h_{AB} + p_B + \frac{\rho * w_B^2}{2}, \quad (1)$$

где  $p_A$  и  $p_B$  - статические давления в сечениях А-А и В-В соответственно;  $w_A$  и  $w_B$  - скорости течения жидкости в сечениях А-А и В-В соответственно;  $h_{AB}$  - потери напора при движении жидкости от сечения А-А к сечению В-В;  $h$  - высота столба жидкости между входом заборного устройства и соеди-

нением с топливной магистралью ( $\frac{h}{d} = 1 \dots 1,5$ );  $a_x = n_x * g$  - продольное ускорение ЛА;  $n_x$  - продольная перегрузка (для ракет носителей и БР обычно их от 6 до 10).

$w_i = \frac{4 * m}{\rho * \pi * d_i^2}$  - скорости движения жидкости в соответствующих сечениях выражениями через массовый расход из бака [3].

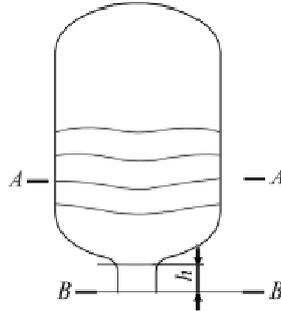


Рис. 1. Расчетная схема топливного бака

Величину потерь давления по длине заборного устройства приближенно можно определить по формуле Дарси-Вейсбаха (2), которая в случае равномерного движения жидкости в круглых трубах имеет вид:

$$h_{AB} = \zeta_{заб.устр.} \frac{8 * m^2}{\pi^2 * \rho^2 * a_x * d_B^4}, \quad (2)$$

где  $\zeta_{заб.устр.} = 0,5$  - коэффициент местного сопротивления заборного устройства.

Кавитационное течение характеризуется безразмерным параметром (число кавитации) (рис. 2):

$$X = \frac{2(P - P_S)}{\rho * V^2}$$

X может принимать несколько значений, в зависимости от вида потоков:

- докавитационный - сплошной или однофазный поток,  $X > 1$ ,
- кавитационный - иначе говоря двухфазный поток,  $X \approx 1$ ,
- суперкавитационный - поток, при котором  $X \ll 1$ ,
- пленочный - с устойчивым отделением кавитационной полости от остального сплошного потока,  $X < 1$  [4-5].

$d_{зб}, м$	$\rho, кг/м^3$	$a_x$	$h, м$	$k_{заб}$	$P_A, МПа$	$P_S, КПа$	$\dot{m}, кг/с$	$w_A, кг/м$	$w_B, кг/м$	$\dot{w}_B, кгс/м^2$	X
0,12	1142,00	98,10	0,10	0,14	0,35	1,47	87,95	0,02	7,41	204,46	0,00
			0,12							1492,81	0,04
			0,13							2781,16	0,08
			0,14							4069,51	0,12
			0,15							5357,85	0,17
			0,16							6646,20	0,21
			0,17							7934,55	0,25
0,12	1142,00	98,10	0,11	0,12	0,35	1,47	87,95	0,02	6,81	8078,50	0,30
			0,12							9422,86	0,35
			0,13							10767,22	0,40
			0,14							12111,59	0,45
			0,16							13455,95	0,50
			0,17							14800,31	0,55
			0,18							16144,67	0,60
0,13	1142,00	98,10	0,11	0,10	0,35	1,47	87,95	0,02	6,28	14565,26	0,64
			0,13							15965,64	0,70
			0,14							17366,01	0,77
			0,15							18766,39	0,83
			0,16							20166,77	0,89
			0,18							21567,15	0,95
			0,19							22967,52	1,01

Рис. 2. Появление кавитации в зависимости от длины h и диаметра  $d_{зб}$  трубопровода

Для расчетов давления в заборном отсеке рассмотрим топливный отсек ракеты-носителя «СОЮЗ» с диаметром, в среднем, около 2 м. Результаты расчетов представлены в виде таблицы (см. рис. 2).

Из рис. 2 следует, что кавитационный поток возникает при увеличении диаметра магистрали до 0,125 м и высоты магистрали до 0,1875 м. Чтобы избежать этого явления при проектировании топливных магистралей необходимо руководствоваться рекомендациями по выбору геометрических размеров арматуры топливных баков, предложенных в работе.

Если кавитацию не получается устранить, то в некоторых случаях оказывается полезным усилить давление во входном осевом колесе турбины, создав режим суперкавитации, при котором обтекание лопаток носит струйный характер, не приводя к каким-либо разрушениям.

### Библиографические ссылки

1. Куденцов, В. Ю. Пневмогидравлические системы и автоматика жидкостных ракетных двигательных установок : учебное пособие / В. Ю. Куденцов, А. Б. Яковлев. Омск : ОмГТУ, 2015. ISBN 978-5-8149-2009-6. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/149121> (дата обращения: 04.09.2022).
2. Кольга В. В. Определение основных проектно-конструктивных параметров и массовых характеристик при проектировании ракет: учеб. пособие / В.В. Колга; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. 112с.
3. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч.1. К.: Полиграфкнига, 1997. 940 с.
4. Перник А. Д. Проблемы кавитации. 2-ое изд. Л.: Судостроение, 1966. 435 с.
5. Кнепп Р Кавитация: пер. с англ. / Р Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит -М.: 1974.- 678 с.

### References

1. Kudentsov, V. Yu. Pneumohydraulic systems and automation of liquid rocket propulsion systems : textbook / V. Yu. Kudentsov, A. B. Yakovlev. Omsk : OmSTU, 2015. ISBN 978-5-8149-2009-6. Text : electronic // Lan : electronic library system. URL: <https://e.lanbook.com/book/149121> (accessed: 04.09.2022).
2. Kolga VV Determination of the main design parameters and mass characteristics in the design of rockets: textbook. allowance / V.V. Kolga; Siberian State University M.F. Reshetnev. - Krasnoyarsk, 2021. - 112p.
3. Fedotkin I. M., Gulyi I. S. Cavitation, cavitation equipment and technology, their use in industry (theory, calculations and designs of cavitation apparatuses). Part 1. - K. : Polygraphkniga, 1997. - 940 p.
4. A. D. Pernik, Problems of cavitation. 2nd ed. Leningrad: Shipbuilding, 1966. 435 p.
5. Knapp R Cavitation: Per. from English. / R Knepp, J. Daly, F. Hammit - M. : 1974. - 678 p.

© Бордачев В. А., Рожкова Е. А., Кольга В. В., 2022

УДК 629.7.015.3

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ДАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬНОЙ РАКЕТЫ

В. А. Бордачев, Е. А. Рожкова, 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: vladimir27032001@mail.ru

*Изучена литература для нахождения зависимости центра масс летательных аппаратов от площади хвостового оперения. Приведены формулы для нахождения аэродинамической нагрузки летательного аппарата. Результаты зависимости проиллюстрированы на графике.*

*Ключевые слова: модельная ракета, центр масс, давление, аэродинамическая стабилизация.*

## METHOD FOR DETERMINING THE POSITION OF THE PRESSURE CENTER OF A MODEL ROCKET

V. A. Bordachev, E. A. Rozhkova, V. V. Kolga

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

*The literature has been studied to find the dependence of the center of mass of aircraft on the area of the tail. Formulas for finding the aerodynamic load of the aircraft are given. The results of the dependence are illustrated in the graph.*

*Keywords: model rocket, center of mass, pressure, aerodynamic stabilization.*

Модельная ракета – это ракета малых размеров для демонстрационного полета на небольшие высоты, не использующая аэродинамическую подъёмную силу несущих поверхностей. Модель ракеты приводится в движение с помощью модельного ракетного двигателя и имеет устройство для безопасного возвращения на землю. Изготавливается она, в основном, из бумаги, дерева, разрушаемого пластика и других неметаллических материалов [1].

Центр давления – это точка приложения полной аэродинамической силы, действующей на тело [2].

Для обеспечения аэродинамической устойчивости модельной ракеты возможны два решения:

1. Стабилизация вращением. Способ основан на способности вращающегося тела сохранять направление оси своего вращения.
2. Аэродинамическая стабилизация. Для этого центр давления ракеты должен находиться ниже ее центра масс.

Наиболее простой способ добиться аэродинамической устойчивости модельной ракеты – использовать второй подход. Для смещения вниз центра масс ракеты необходимо увеличить количество и площадь стабилизаторов, а также сместить их расположение ниже по оси корпуса ракеты. Важным фактором при этом является площадь стабилизаторов.

На корпус ракеты действует аэродинамическая нагрузка. Зная величину этой нагрузки и точку приложения её составляющих, можно найти полную аэродинамическую силу  $R$  через координату  $X_{ц.д.}$  и сумму составляющих аэродинамической силы:

$$X_{ц.д.} = \frac{R_{зо} * X_{зо} + R_{к} * X_{к} + R_{см} * X_{см}}{R},$$

где  $R_{зо}$ ,  $R_{к}$  и  $R_{см}$  – аэродинамические силы, действующие на головной обтекатель, корпус ракеты и стабилизаторы [3].

Поскольку аэродинамическая сила зависит от скорости полёта, то будет удобнее рассчитывать ее с помощью безразмерных коэффициентов лобового сопротивления  $C_R$ .

$$X_{ц.д.} = \frac{C_{R_{гоXго}} + C_{R_{кXк}} + C_{R_{стXст}}}{C_R},$$

причём  $C_R = C_{R_{го}} + C_{R_{к}} + C_{R_{ст}}$ .

Цилиндрическое тело при малых углах атаки не создаёт подъёмной силы, поэтому коэффициент  $C_{R_{к}}$  близок к нулю [4].

Для обтекателей конического типа коэффициент  $C_{R_{го}} = 2$ , а для головного обтекателя этого типа центр давления расположен на расстоянии  $X_{ц.д.} = \frac{2}{3} l_{го}$  от его носовой точки, где  $l_{го}$  - длина головного обтекателя.

Коэффициент сопротивления для стабилизаторов зависит от числа стабилизирующих поверхностей. Для стабилизатора с числом поверхностей равным N этот коэффициент подсчитывается по формуле:

$$C_{R_{ст}}^* = \frac{\gamma * (l_{ст}^*/d)^2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot l_{сп}}{b_{корн} + b_{конц}}\right)^2}},$$

где  $l_{ст}^*$  - размах пера стабилизатора;  $l_{сп}$  - размах по средней линии;  $b_{конц}$  - концевая хорда стабилизатора;  $b_{корн}$  - корневая хорда стабилизаторов. Коэффициент  $\gamma$  зависит от количества стабилизаторов.

Аэродинамическое взаимодействие стабилизаторов и корпуса модели ракеты учитываются коэффициентом:  $K_p = 1 + \frac{r}{l_{сп} + r}$ , где  $r$  - радиус корпуса модели. Тогда коэффициент нормальной силы для всей кормовой части модели ракеты равен:

$$C_{R_{ст}} = K_p \cdot C_{R_{ст}}^*.$$

Положение центра давления стабилизатора зависит от формы стабилизатора и его размещения:

$$X_k = L + \frac{\Delta l (b_{корн} + 2b_{конц})}{b_{корн} + b_{конц}} + \frac{1}{6} \left( b_{корн} + b_{конц} - \frac{b_{корн} \cdot b_{конц}}{b_{корн} + b_{конц}} \right),$$

где  $L$  - расстояние от носовой точки модели до корневой хорды стабилизаторов;  $\Delta l$  - расстояние между началом корневой и концевой хорд стабилизатора.

Определим зависимость центра давления от площади стабилизаторов при граничных условиях:  $b_{корн} = b_{конц} = l_{го} = L = d = r = l_k = \text{const}$ .

Для удобства выбора количества стабилизаторов модельной ракеты и положения центра давления был построен график (см. рисунок).

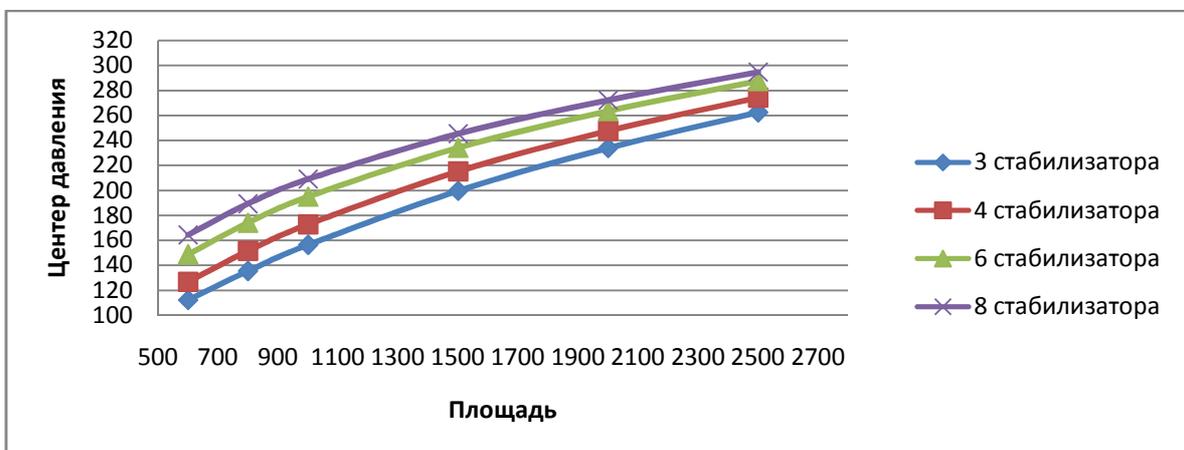


График зависимости центра давления модели от площади стабилизаторов

Таким образом, нами предложена упрощенная методика выбора количества стабилизаторов модельной ракеты и положения её центра давления.

### **Библиографические ссылки**

1. Модели самолетов, авиамодели, чертежи авиамоделей авиамоделирование [Электронный ресурс]. URL: [https://masteraero.ru/modeli\\_raket-36.php](https://masteraero.ru/modeli_raket-36.php) (дата обращения: 02.9.2022).
2. Ракетное моделирование. Техническое руководство. Автор: William Simon в редакции Thomas Beach и Joyce Guzik, 1993 г. 16 с.
3. Моя ракетная мастерская [Электронный ресурс]. URL: <http://serge77-rocketry.net/rs7/rs7.htm> (дата обращения: 02.9.2022).
4. Расчет аэродинамических характеристик летательных аппаратов: Учеб. пособие / Васильев В.В., Порозов JL.В., Шахов В.Г. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1993. 79 с.

### **References**

1. Models of aircraft, aircraft models, drawings of aircraft models, aircraft modeling [Electronic resource]. URL: [https://masteraero.ru/modeli\\_raket-36.php](https://masteraero.ru/modeli_raket-36.php) (date of access: 02.09.2022).
2. Rocket Modeling Technical Guide. Author: William Simon edited by Thomas Beach and Joyce Guzik, 1993. 16 p.
3. My rocket workshop [Electronic resource]. URL: <http://serge77-rocketry.net/rs7/rs7.htm> (accessed 02.09.2022).
4. Calculation of the aerodynamic characteristics of aircraft: Proc. allowance / Vasiliev V.V., Porozov JL.V., Shakhov V.G. Samara State Aeronautical Univ. Samara, 1993. 79 p.

© Бордачев В. А., Рожкова Е. А., Кольга В. В., 2022

УДК 629.7.05

## РАЗРАБОТКА МАЛОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РАКЕТЫ «VELOX» КАК ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ

Е. А. Виноградова, А. Ю. Демина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: katrina.vinogradova7001@mail.ru

*Рассматривается практико-ориентированный метод обучения студентов, а именно работа в студенческих конструкторских бюро, с целью повышения профессиональной квалификации обучающихся в сфере ракетостроения.*

*Ключевые слова: студенты, экспериментальная модель ракеты, инженерная компетенция, студенческое конструкторское бюро.*

## DEVELOPMENT OF SMALL EXPERIMENTAL MODEL ROCKET «VELOX» AS A PRACTICE-ORIENTED METHOD OF STUDENTS EDUCATION

E. A. Vinogradova, A. Y. Demina

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: katrina.vinogradova7001@mail.ru

*The article considers a practice-oriented method of student education, especially work in student design labs, in order to improve the professional skills of students in the field of rocket engineering.*

*Keywords: students, experimental rocket model, engineering competence, student design lab.*

После получения диплома многие выпускники сталкиваются с непониманием того, с чем им придётся работать дальше. Это происходит из-за того, что в современном высшем образовании присутствует недостаточное количество практико-ориентированных методов обучения студентов. Можно ли организовать обучение иначе?

Рассмотрим реализацию обучения инженерным компетенциям [1] в области ракетной техники на примере Студенческого Конструкторского Бюро «RocketLAV» (далее СКБ), базирующегося в СКБ-4 на южной площадке Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева [2]. В рамках работы в СКБ студенты получают навыки и умения, необходимые им в дальнейшей работе в более серьёзных проектах, развивают лидерские качества, учатся работать в команде. Участники объединения проходят полный цикл производства проекта: от идеи до запуска. Примером такого технического проекта является малая экспериментальная модель ракеты Velox (рис. 1). Данная модель была разработана в рамках участия во Всероссийском чемпионате «Воздушно-инженерная школа» [3]. Модель ракеты выводит полезную нагрузку массой 350г на высоту более 400 м.

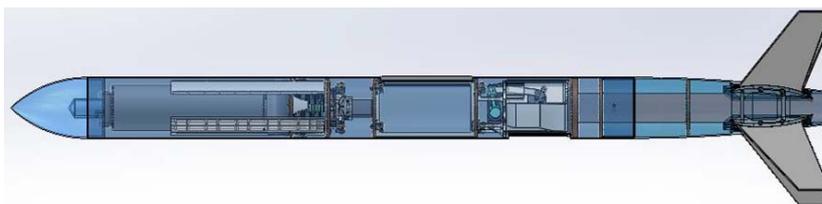


Рис. 1. 3D-модель экспериментальной модели

При разработке проекта студенты получили навыки работы в следующем программном обеспечении: Stabtraj, Open Rocket, Solid Works, EasyEda, Arduino IDE. Данные, полученные после запусков, были обработаны и преобразованы в графики зависимости [4] высоты от времени, скорости от вре-

мени и т.д. Пример представлен на рис. 2. Согласно этим данным, максимальная достигнутая высота составляет 486 метров.

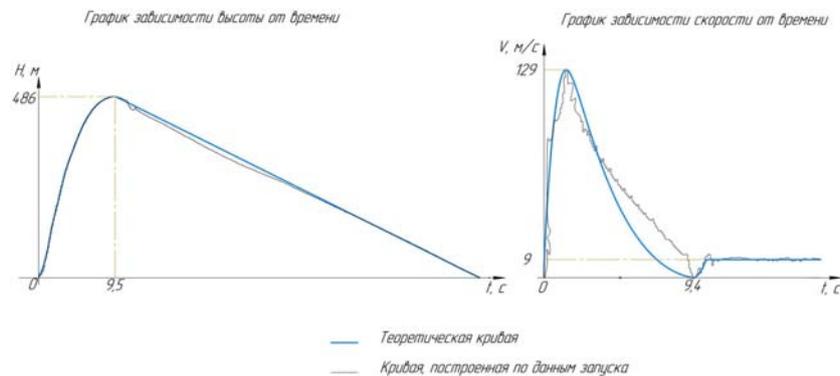


Рис. 2. Графики, построенные на основании полученных данных

По окончании проекта участники получили начальный опыт в ракетостроении, познакомились с жизненным циклом ракетной техники, получили и закрепили на практике профессиональные навыки. Участники объединения чувствуют уверенность в достижении своих целей в ракетно-космической отрасли, они полностью готовы для работы в более серьезных и амбициозных проектах [5].

### Библиографические ссылки

1. Гусейнова Е.Л. Формирование профессиональных компетенций в самостоятельной работе студентов технических ВУЗов [электронный ресурс] / Е.Л. Гусейнова // Сибирский педагогический журнал №5 2014 г. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/formirovanie-professionalnyh-kompetentsiy-v-samostoyatelnoy-rabote-studentov-tehnicheskikh-vuzov> (дата обращения: 01.09.22)
2. Решетневские чтения [электронный ресурс] // под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. // материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева в 2 ч. Красноярск, 2019 г. Ч. 2 ст. 661-662 URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialykonferentsii>. (дата обращения: 01.09.22)
3. Воздушно-инженерная школа CanSat в России: [Электронный ресурс]. URL: <https://roscansat.com/>. (дата обращения: 01.09.2022)
4. Колесников К. Динамика ракет: Учебник для вузов. 2 е изд., исправл. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 520 с.: ил.
5. Решетневские чтения [электронный ресурс] // под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. // материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева в 2 ч. Красноярск, 2020 г. Ч. 1 ст. 36-37 URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialykonferentsii>. (дата обращения: 01.09.22)

### References

1. Guseynova E.L. The formation of professional competence in independent work of student of technical universities [Electronic resource] / E.L. Guseynova // Siberian Pedagogical Journal №5 2014 year URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/formirovanie-professionalnyh-kompetentsiy-v-samostoyatelnoy-rabote-studentov-tehnicheskikh-vuzov> (date of application: 01.09.22)
2. Reshetnev readings [electronic resource] // under the general editorship of Yu. Yu. Loginov. // 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 a.m. Krasnoyarsk, 2019 Part 2 of Article 661-662 URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialykonferentsii>. (date of application: 01.09.22)
3. Air Engineering School CanSat in Russia: [electronic resource]. URL: <https://roscansat.com/>. (date of application: 01.09.2022)
4. Kolesnikov K. Dynamics racquet: textbook dylя wuzov. 2nd ed. right. and touch. M. Mechanical engineering, 2003. 520 C. II.
5. Reshetnev readings [electronic resource] // under the general editorship of Yu. Yu. Loginov. // 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 a.m. Krasnoyarsk, 2020 Part 1 of Article 36-37 URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialykonferentsii>. (date of application: 01.09.22)

УДК 621.396.67:629.78.002.3

## СПОСОБЫ РЕЗКИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕФЛЕКТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ RTM-ТЕХНОЛОГИИ

М. Е. Гераскина, Т. Ю. Казакова, Ю. Г. Непомнящий, Н. Г. Цытыркин, С. А. Титаренко

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: geraskiname@iss-reshetnev.ru

*Рефлектор является одним из основных элементов бортовых антенн космического аппарата (КА). При изготовлении рефлектора из углепластика возникла проблема выбора способа разрезки его на сегменты с учётом требований по ширине реза.*

*Ключевые слова: рефлектор, способ, резка, фрезерование.*

## METHODS OF CUTTING THE CURVED SURFACE OF THE REFLECTOR MANUFACTURED BY RTM-TECHNOLOGY

M. E. Geraskina, T. Y. Kazakova, Y. G. Nepomnyashchii, N. G. Tsytirkin, S. A. Titarenko

Siberian Federal University  
12a, Kirova Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation  
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

*The reflector is one of the main elements of the onboard antennas of the spacecraft. When performing the technological process for the manufacture of the reflector, there was a problem of cutting into segments and cutting out the central part.*

*Keywords: reflector, method, cutting, milling.*

В данной работе рассмотрены три различных способа разрезки рефлектора зеркальной антенны наземной спутниковой системы. Рефлектор изготовлен из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением технологии RTM (Resin Transfer Moulding) формования. Данная технология удовлетворяет высокому уровню заданных технических требований, предъявляемых к рефлекторам бортовых антенн и квалифицирована для функционирования в условиях неблагоприятных факторов космического пространства [1]. Выбора материалов составных частей рефлекторов подробно рассмотрен в [2]. RTM-технология подробно описана в [3].

Согласно требований конструкторской документации изготовленный из ПКМ рефлектор подлежит разрезке на сегменты с вырезом центральной части для удобства его дальнейшего транспортирования. При этом ширина реза задана в пределах  $0,8 \pm 0,2$  мм. Для выполнения реза стандартным способом по технологии фрезерования необходима фреза менее  $\varnothing 1$  мм. Однако, с уменьшением диаметра фрезы уменьшается и величина её рабочей части. У рефлектора для придания ему жесткости выбрана толщина 11 мм с утолщением по краям до 21 мм. В связи с чем цилиндрической фрезе придется работать на максимальной глубине врезания. Для выполнения резки применяется специализированная технологическая оснастка (СТО) для фиксации сегментов рефлектора в процессе разрезки для стабильности технологического процесса. Альтернативным способом резки может быть применение дисковой фрезы, взамен цилиндрической, имеющей большую стойкость и глубину врезания, однако имеющую большее значение по ширине реза (с учётом имеющегося режущего инструмента). Другим способом резки может являться применение установки гидроабразивной резки (УГАР),

имеющей высокую скорость резки, без ограничений по глубине резания, но с неизвестными результатами по выполнению ширины реза (требовалась технологическая обработка и опробование).

Решение данной задачи позволит оценить различные способы выполнения резки криволинейной поверхности рефлекторов  $\varnothing 1,2$  м и  $\varnothing 0,5$  м, качество реза обработанной поверхности и обеспечение ширины реза в заданных КД пределах. Так же требуется оценить скорость выполнения каждого способа резки, так как данный рефлектор планируется изготавливать серийно с определенным тактом выпуска.

Первым способом опробования выбрана резка рефлектора на УГАР, имеющего точность позиционирования  $0,05$  мм. С целью обеспечения ширины реза в соответствии с заданными требованиями  $0,8 \pm 0,2$  мм использовалась фокусирующая трубка КМТ 76х947х76  $\varnothing 0,76$  мм.

Резка образца рефлектора проводилась в ручном режиме, так как движение инструмента было невозможно обеспечить программным способом из-за отсутствия требуемой опции на УГАР. Данная установка не позволяет повернуть фокусирующую трубку под таким углом, чтобы фокусирующая трубка была всегда под прямым углом к сферической поверхности рефлектора. При этом скорость реза была довольно высокой и позволяла разрезать весь рефлектор на сегменты в течение часа, однако требовалось значительное время на переустановку рефлектора на СТО и УГАР для выполнения следующего реза.

Результат резки на УГАР в ручном режиме показал неудовлетворительные результаты, сам образец получился некачественным, с уходом от прямолинейности и видимыми ступенчатыми переходами на резе при каждом ступенчатом подъеме фокусирующей трубки (рис. 1, 2).



Рис. 1. Результат разрезки образца рефлектора  $\varnothing 0,5$  м на УГАР

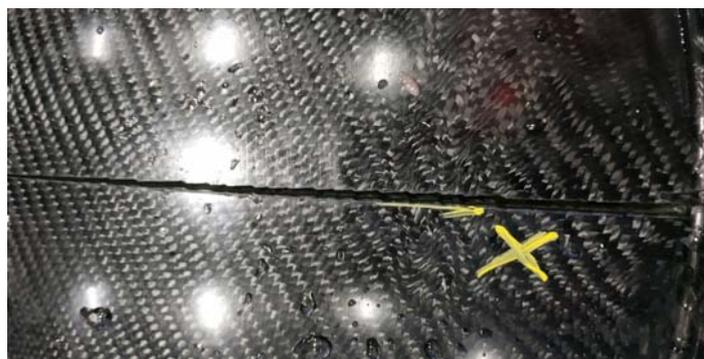


Рис. 2. Пример разнотолщинности реза образца рефлектора  $\varnothing 0,5$  м на УГАР

Вторым способом резки было выбрано фрезерование на портально-фрезерном обрабатывающем центре цилиндрической фрезой  $\varnothing 0,5$  мм. При фрезеровании применялись следующие режимы резания:  $n$  (число оборотов) = 8000 об/мин,  $S$  (подача) = 80 мм/мин, со снятием материала  $0,1$  мм за проход. В связи с невысокой скоростью подачи во избежание поломки фрезы программа ЧПУ была рассчитана на 5 часов работы для выполнения только одного сквозного реза (рис. 3). Движение инструмента при фрезеровании осуществлялось снизу вверх. Во время фрезерования выдув снятого мате-

риала из реза рефлектора осуществлялся сжатым воздухом и удалялся стационарной пылеудаляющей системой.



Рис. 3. Разрезка образца рефлектора  $\varnothing 0,5$  м, установленном в СТО, на портално-фрезерном обрабатывающем центре фрезой  $\varnothing 0,5$  мм

В процессе фрезерования рефлектора произошла поломка фрезы в самом нагруженном месте (в переходе обнижения хвостовика с конуса на режущую часть). На поломку режущего инструмента (РИ) могли повлиять следующие факторы:

- вибрация режущего инструмента во время работы;
- возможное биение инструмента;
- уменьшение силы резания вследствие износа режущих кромок инструмента;
- повышение температуры в зоне резания вызывает налипание наполнителя на режущую кромку и как следствие уменьшает силу резания и увеличивает вибрации [4-5].

Таким образом, второй способ разрезки рефлектора на портално-фрезерном обрабатывающем центре с применением цилиндрической фрезой показал низкую стойкость режущего инструмента. Несмотря на довольно качественно выполненный рез без сколов и трещин, шириной 0,6 мм время механической обработки являлось очень длительным и не подходило под требуемый такт изготовления. В случае уменьшения скорости подачи РИ для его сохранности от поломки время обработки так же возрастёт.

Третий способ резки образца рефлектора проводился так же на портално-фрезерном обрабатывающем центре, но с применением отрезного алмазного диска  $\varnothing 115$  мм и толщиной 1,2 мм с применением угловой головки (рис. 4) и закреплением рефлектора в универсальном сборочном приспособлении (УСП). По техническим характеристикам угловой головки максимальное количество оборотов может достигать 4000 об/мин. При использовании угловой головки были отработаны и выбраны оптимальные режимы резания, а именно: скорость 2000 об/мин при подаче 200 мм/мин. Соотношение передачи оборотов в минуту через угловую головку приходится 1:1. При выполнении механической обработки применялась стационарная вытяжная система. Весь процесс резки рефлектора с учетом переустановки и позиционирования занял не более 4 часов.



Рис. 4. Разрезка образца рефлектора  $\varnothing 0,5$  м, установленном в СТО, на портално-фрезерном обрабатывающем центре дисковой фрезой толщиной 1,2 мм

Разрезка рефлектора на портально-фрезерном обрабатывающем центре с применением угловой головки и отрезного алмазного диска показала высокое качество реза без нарушения структуры углеволокна и отслоения материала. Однако ширина реза с учетом выбранного алмазного круга составила порядка 1,4 мм (полученная ширина реза по итогу обработки устроила разработчиков КД).

С учетом проведенных работ определен наиболее подходящий под серийное производство рефлекторов из ПКМ способ резания – фрезерование дисковой фрезой или алмазным кругом с применением угловой головки.

#### **Библиографические ссылки**

1. Гардымов Г. П., Мешков Е.В. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. СПб.: СпецЛит, 1999 с. 10-18
2. Бердникова Н. А., Иванов А.В., Белов О.А., Чечурин В.Е. / Проектирование крупногабаритного высокочастотного рефлектора антенны космического аппарата с контурной диаграммой направленности. // Вестник СибГАУ Том 17, №2, с.378-387.
3. Трофимов Н. Н., Канович М.З. Основы создания полимерных композитов М.: Наука, 1999, с. 539
4. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / В. А. Вавилин, К. А. Пасечкин, А. Ю. Пушкарев, Н. А. Амельченко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики 2018. Том 1. с. 12-14.
5. Особенности технологии механической обработки углепластиков / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев, А. С. Заостровский // Science intensive technologies in mechanical engineering, №5, 2016. С. 30-33.

#### **References**

1. Gardymov G. P., Meshkov E. V. Composite materials in rocket and space apparatus construction. St. Petersburg: SpetsLit, 1999 p. 10-18
2. Berdnikova N. A., Ivanov A. V., Belov O. A., Chechurin V. E. / Designing a large-sized high-frequency reflector antenna of a spacecraft with a contour directional pattern. // Bulletin of SibGAU Volume 17, No.2, p.378-387.
3. Trofimov N. N., Kanovich M. Z. Fundamentals of polymer composites creation M.: Nauka, 1999, p. 539
4. Features of mechanical processing of polymer composite materials / V. A. Vavilin, K. A. Pasechkin, A. Yu. Pushkarev, N. A. Amelchenko // Actual problems of aviation and cosmonautics 2018. Volume 1. p. 12-14.
5. Features of the technology of mechanical processing of carbon fiber plastics / Yu. M. Zubarev, A.V. Priemyshev, A. S. Zaostrovsky // Science intensive technologies in mechanical engineering, No. 5, 2016. p. 30-33.

© Гераськина М. Е., Казакова Т. Ю., Непомнящий Ю. Г.,  
Цытыркин Н. Г., Титаренко С. А., 2022

УДК 532.525.6

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ СОПЛА

В. С. Козлов, С. В. Котельникова

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

*Представлено устройство для измерения осевой составляющей реактивной силы сверхзвукового сопла.*

*Тензометрический измеритель, тяга, реактивная сила, сверхзвуковое сопло.*

## NOZZLE THRUST MEASUREMENT DEVICE

V.S. Kozlov, S.V. Kotelnikova

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

*A device for measuring the axial component of the reactive force of the supersonic nozzle is presented.*

*The tensometric meter, thrust, reactive force, supersonic nozzle.*

Современные экспериментальные исследования и испытания в аэродинамических трубах характеризуются существенными энергетическими затратами. Поэтому, прежде всего необходимо уменьшить длительность самих испытаний, а также повысить точность и надежность их результатов. Одним из путей уменьшения длительности испытаний является максимальная автоматизация процесса исследований с использованием средств измерений, обладающих высокими метрологическими свойствами при заданном быстродействии. Задачи комплексной автоматизации многофакторного эксперимента не могут быть решены традиционными измерительными системами с преобразователями механического типа. Для решения задач измерений при аэродинамических испытаниях и повышения уровня их автоматизации необходимо использовать тензометрические измерительные системы [1-5].

С этой целью разработано устройство для непосредственного измерения осевой составляющей реактивной силы сверхзвукового сопла, в котором в качестве первичного преобразователя использован упруго-деформируемый контур с тензорезисторами. Это устройство позволяет измерять величину действующей нагрузки до 2000 Н при изменении полного давления в ресивере сверхзвуковой установки в диапазоне  $p_0 = 0 \div 10$  МПа.

Измеритель (рис. 1) конструктивно состоит из трех частей: переходного узла (а); измерительного устройства (б); соплового блока (в). Сопловой блок закрепляется на измерительном устройстве, представляющим собой крестообразную упруго-деформируемую балку (4), выполненную совместно с присоединительным кольцом. Силовые упругие элементы этой балки имеют наименьшую жесткость относительно продольной оси сопла и удовлетворяют требованиям норм прочности для моделей, используемых в аэродинамических трубах. При приложении нагрузки вдоль этой оси возникают наибольшие деформации упругих элементов, измерение которых производится с помощью системы тензодатчиков. Тензодатчики наклеены с обеих сторон упругих элементов в местах наибольших сигнальных напряжений на расстоянии  $a = l_t/2 + (0,5 \rightarrow 1,0)$ , (где  $l_t$  – база тензодатчика) от места заделки.

Напряженное состояние на поверхности упругого элемента, к которой приклеен датчик, изменяется от точки к точке, поэтому изменение сопротивления датчиков пропорционально некоторому среднему напряжению на участке с длиной равной базе датчика. Для того чтобы датчики фиксировали напряжение в точке использованы датчики с малой базой (5 мм) с сопротивлением 200 Ом. Тензодатчики соединены по мостовой схеме и включены во все четыре плеча моста, что позволяет существенно повысить чувствительности и обеспечить большую точность измерений. С помощью переходного

узла измеритель устанавливается на присоединительном фланце ресивера газодинамического стенда (1). Воздух высокого давления из ресивера стенда подается по двум гибким стальным рукавам (2) в форкамеру соплового блока, имеющего сменные сопловые насадки (3).

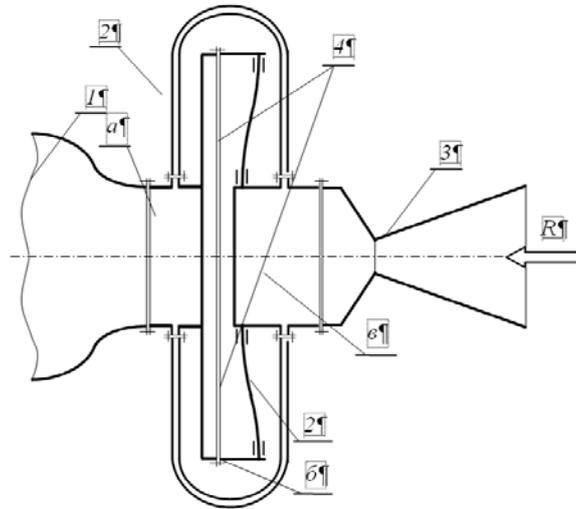


Рис. 1. Схема устройства для измерения тяги

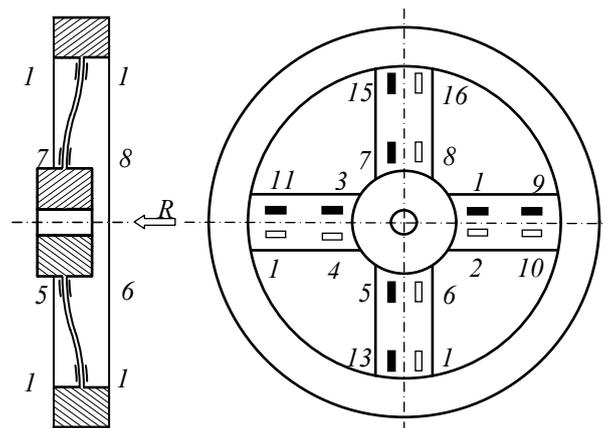


Рис. 2. Измерительное устройство

Схема измерительного устройства изображена на рис. 2. Под действием измеряемой силы происходит «S-образный» изгиб упругих элементов тензобалки. Датчики, расположенные на противоположных сторонах элементов, включены в смежные плечи моста. Питание тензометрического моста осуществляется от прецизионного источника постоянного напряжения. Снимаемый с тензомоста сигнал усиливается, фиксируется и через коммутатор высокого уровня поступает в измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) на аналого-цифровой преобразователь и затем на персональную ЭВМ.

Принципиальная схема измерения представлена на рис. 3. Схема состоит из моста и усилителя-нормализатора (УН) сигналов, обеспечивающего получение нормированного значения выходного напряжения в ИВК. Предварительная балансировка тензомоста осуществляется при помощи балансирующего устройства (БУ). Сбор и накопление измерительной информации, поступающей с УН, выполняет измерительно-вычислительный комплекс. Условием равновесия тензомоста является равенство:

$$R_{1,5,10,14,3,7,12,15} = R_{2,8,9,15,4,6,11,13}$$

Изменение сопротивления тензорезисторов на величину  $R$  пропорциональное величине действующей нагрузки, нарушает баланс тензомоста.

В измерительной диагонали тензомоста возникает напряжение, пропорциональное величине относительной деформации тензопреобразователя, напряжению питания  $U_n$  и тензочувствительности  $K_s$  тензорезисторов:

$$U = U_n \cdot n_t / 4 \cdot k_s,$$

где  $n_t$  – число активных плеч тензомоста.

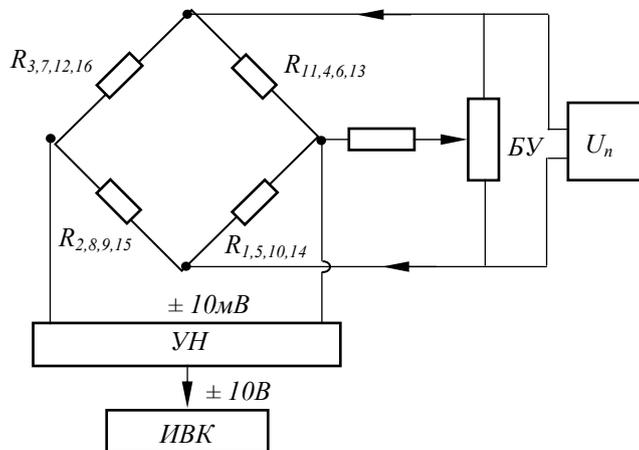


Рис.3. Принципиальная схема измерителя

Основная относительная погрешность схемы измерения при  $U_n = 9B$  будет:

$$\sigma = \pm[(0,13+0,03(U_k \cdot U_t / -1))] \text{ при } P = 0,99,$$

где  $U_k$ ,  $U_t$  – конечное и текущее значения измеряемой величины;  $P$  – принятая для этого случая доверительная вероятность оценки доверительного интервала.

### Библиографические ссылки

1. Горлин С. М., Слезингер И.Н. Аэромеханические измерения. Методы и приборы.- М.:Наука, 1964,720 с.
2. Ведржицкий Е. Л., Дубов Б.С., Радциг А.Н. Теория и практика аэродинамического эксперимента. М.: МАИ, 1990, 216 с.
3. Радциг А. Н. Экспериментальная гидроаэромеханика. М.: Изд-во МАИ, 2004, 294с.
4. Тензометрические системы для экспериментальных исследований /Беклемишев А.И., Дубов Б.С., Клокова Н. П., Кедров В. В. // ФГУП ЦАГИ, Измерительная техника, №11, 1979,
5. Горшенин Д. С., Мартынов А. К. Методы и задачи практической аэродинамики М. : Машиностроение, 1977,240 с.

### References

1. Gorlin S. M., Slusinger I. N. Aeromekhanic dimensions. Methods and devices .- М .: Science, 1964.720 p.
2. Vedrzhitsky E. L., Dubov B. S., Radzig A. N. Theory and practice of an aerostal experiment. M.: MAI, 1990, 216 p.
3. Radzig A.N. Experimental hydroaeromemechanics. M.: MAI Publishing House, 2004, 294 p.
4. Tenzometric systems for experimental studies /Beklemyshev A.I., Dubov B.S., Kloкова N.P., Kedrov V.V. // FSUE TsAGI, measuring equipment, No. 11, 1979,
5. Gorshenin D. S., Martynova.K. Methods and tasks of practical aerodynamics M .: Mechanical Engineering, 1977,240 p.

УДК 629.78.01

## ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ПАССИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. Колмаков, А. А. Внуков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
E-mail: kolmakov\_aleksandr9@mail.ru

*Сближение космических аппаратов с использованием космической тросовой системы.*

*Ключевые слова: космическая тросовая система, трос, центр масс.*

## APPLICATION OF TETHERED SPACE SYSTEM TO SERVICE SATELLITE

A. V. Kolmakov, A. A. Vnukov

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: kolmakov\_aleksandr9@mail.ru

*Approach of satellites using tethered space system.*

*Keywords: tethered space systems, cable, center of mass.*

Космической тросовой системой (КТС) называют систему искусственных космических объектов (спутников, грузов), соединённых протяжёнными гибкими элементами. В простейшем виде КТС – это космический аппарат и концентрированная масса (груз), соединённые тросом переменной длины [1-2].

Космическую тросовую систему предполагается использовать как способ сближения космических аппаратов на орбите для сервисного обслуживания спутников. Сервисное обслуживание включает в себя следующие задачи: удаление космического мусора, дозаправка топливом обслуживаемого аппарата, изменение его орбиты и другие.

Рассматриваемая КТС состоит из сервисного космического аппарата (КА), груза и троса переменной (управляемой) длины, который их соединяет. Сервисный и обслуживаемый КА двигаются по круговой орбите.

Математическое моделирование движения сервисного КА при развёртывании тросовой системы рассматривается с точки зрения движения центра масс КТС. Гравитационные моменты, вращательное движение и другие возмущающие воздействия не учитываются.

Упрощённую модель относительного орбитального движения сервисного и обслуживаемого КА можно описать уравнениями Клохесси–Уилтшира [3], которые имеют решение в замкнутой форме [4-5]:

$$x(t) = (4 - 3\cos nt)x_0 + \frac{x_0}{n} \sin nt + \frac{2\dot{y}_0(1 - \cos nt)}{n} \quad (1)$$

$$y(t) = \left(\frac{4\dot{y}_0}{n} + 6x_0\right) \sin nt + \frac{2x_0}{n} \cos nt - (6nx_0 + 3\dot{y}_0)t + \left(y_0 - \frac{2x_0}{n}\right) \quad (2)$$

$$z(t) = z_0 \cos nt + \frac{\dot{z}_0}{n} \sin nt \quad (3)$$

где  $n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$  – среднее движение;  $\mu$  – гравитационный параметр Земли,  $\mu = 398600 \text{ км}^3/\text{с}^2$ ;  $a$  – радиус круговой орбиты тела, для геостационарной орбиты  $a = 42164 \text{ км}$ ;  $(x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$  – координаты и

проекции скорости активного КА относительно пассивного КА на соответствующие оси относительной системы координат в некоторый момент времени  $t_0$ . Начало относительной системы координат располагается в центре масс обслуживаемого космического аппарата, ось  $x$  направлена вдоль вектора радиуса КА, ось  $y$  – вдоль вектора скорости КА, а ось  $z$  – перпендикулярно плоскости  $O_{xy}$ .

Решение системы уравнений Клохесси-Уилтшира в замкнутой форме соответствует изменению относительных координат сервисного космического аппарата, то есть показывает, как нужно перемещаться активному КА, чтобы не менялось расстояние между активным и пассивным КА (например, для инспектирования обслуживаемого аппарата сервисным). Для установления закона сближения активного КА с пассивным «вдогонку», то есть вдоль вектора орбитальной скорости, достаточно рассмотреть изменение координаты  $y$ .

Для того чтобы понять, на какое расстояние необходимо отдалять груз, для реализации необходимого перемещения сервисного КА, необходимо увязать вместе уравнения Клохесси-Уилтшира и закономерность изменения центра масс КТС при активном перемещении груза.

При определении координат центра масс системы за начало координат принимаем центр масс активного КА без груза. Если поместить начало координат в центр масс активного КА (без груза), то изменение положения центра масс по оси будет пропорционально изменению расстоянию между центрами масс КА и груза (при условии, что массой троса пренебрегаем):

$$Y_{\text{цм}} = \frac{m}{m+M_{\text{ка}}} \cdot Y_{\Gamma} \quad (4)$$

где  $m$  – масса груза;  $M_{\text{ка}}$  – масса космического аппарата;  $Y_{\Gamma}$  – координата груза относительно центра масс активного КА.

При изменении длины троса уравнение преобразуется к виду:

$$Y_{\text{цм}}(t) = \frac{m}{m+M_{\text{ка}}} \cdot \dot{Y}_{\Gamma} \cdot t \quad (5)$$

где  $\dot{Y}_{\Gamma}$  – скорость изменения координаты центра масс груза относительно координаты центра масс активного КА (скорость размотки троса).

Для того чтобы сервисный КА как минимум не менял своего положения относительно пассивного КА, изменение координат центра масс системы «активный КА – груз» должно быть обратным изменению координат этой системы при относительном движении (см. уравнение (3)):

$$-\frac{m}{m+M_{\text{ка}}} \cdot \dot{Y}_{\Gamma} \cdot t = \left( \frac{4\dot{y}_0}{n} + 6x_0 \right) \sin nt + \frac{2x_0}{n} \cos nt - (6nx_0 + 3y_0)t + \left( y_0 - \frac{2x_0}{n} \right),$$

откуда

$$\dot{Y}_{\Gamma} \cdot t = -\frac{m+M_{\text{ка}}}{m} \left[ \left( \frac{4\dot{y}_0}{n} + 6x_0 \right) \sin nt + \frac{2x_0}{n} \cos nt - (6nx_0 + 3y_0)t + \left( y_0 - \frac{2x_0}{n} \right) \right] \quad (6)$$

Чтобы происходило сближение активного и пассивного КА, в правую часть уравнения добавляем изменение расстояния между КА ( $L$ ). Получаем уравнение, описывающее зависимость между длиной троса и изменением расстояния между пассивным и активным КА:

$$\dot{Y}_{\Gamma} \cdot t = -\frac{m+M_{\text{ка}}}{m} \left[ \left( \frac{4\dot{y}_0}{n} + 6x_0 \right) \sin nt + \frac{2x_0}{n} \cos nt - (6nx_0 + 3y_0)t + \left( y_0 - \frac{2x_0}{n} \right) - \dot{L} \cdot t \right] \quad (7)$$

где  $\dot{L}$  – требуемая (или предельно допустимая) скорость сближения активного и пассивного КА.

Полученное уравнение позволяет установить, на какое расстояние и с какой скоростью необходимо отдалить груз из состава КТС (для любой массы груза), чтобы произвести сближение сервисного КА с обслуживаемым КА с заданной относительной скоростью.

Использование КТС для окончательного сближения космических аппаратов позволяет отказаться от использования двигателей большой тяги, реактивная струя которых может повредить пассивный космический аппарат при сближении, и многократное применение которых ограничено предельной массой запаса топлива на борту сервисного КА.

### Библиографические ссылки

1. Орлов А. Л., Лобачев В. И. Основные проблемы управления тросовой системой в космосе. // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2012. № 6. с. 9-13.
2. Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями / Алпатов А. П., Белецкий В. В., Драновский В. И. и др. // НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований. – Москва-Ижевск, 2007. – 560 с.
3. Clohessy W. H., Wiltshire R.S. Система наведения терминала для спутниковой встречи // J. AerospaceSci., 27 (9), 1960, pp. 653–658. DOI: <https://doi.org/10.2514/8.8704>.
4. Ермаков Д. Н., Оливио А. П. Исторические аспекты построения оптимального алгоритма управления сближением двух спутников с использованием непрерывной малой тяги // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Чебоксары, 2021. С. 92-102.
5. Маштаков Я. В. Построение некоторых опорных относительных орбит для тетраэдральной конфигурации спутниковой связи // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыш. – 2017. – №84. – 26 с. doi: 10.20948.

### References

1. Orlov A. L., Lobachev V. I. Osnovnye problem upravleniya trosovoy sistemoy v kosmose. // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik. 2012. № 6. s. 9-13.
2. Dinamika kosmicheskikh sistem s trosovymi i sharnirnymi soedineniyami / Alpatov A. P., Beletskiy V. V., Dranovskiy V. I. i dr. // NITs «Regulyarnaya i khoaticheskaya dinamika», Institut komp'yuternykh issledovaniy. – Moskva-Izhevsk, 2007. – 560 s.
3. Clohessy W. H. Terminal Guidance System for Satellite Rendezvous // J. AerospaceSci., 27 (9), 1960, pp. 653–658. DOI: <https://doi.org/10.2514/8.8704>.
4. Ermakov D. N, Olivio A. P. Istoricheskie aspekty postroeniya optimal'nogo algoritma upravleniya sblizheniem dvukh sputnikov s ispol'zovaniem nepreryvnoy maloy tyagi // Sbornik materialov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Cheboksary, 2021. S. 92-102.
5. Mashtakov Ya. V. Postroenie nekotorykh opornykh odnositel'nykh orbit dlya tetraedral'noy konfiguratsii sputnikovoy svyazi // Preprinty IPM im. M.V. Keldysh. – 2017. – №84. – 26. doi: 10.20948.

© Колмаков А. В., Внуков А. А., 2022

УДК 52-323.8

## АНАЛИЗ МАНЕВРА ДОВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НА НИЗКОЙ КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

И. К. Коловский\*, Д. Н. Шмаков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: kolovigor@mail.ru

*Исследуется баллистическое построение спутниковой системы на низкой круговой орбите. Анализируется схема довыведения космических аппаратов на целевую орбиту с орбиты хранения. Проблема актуальна в случае, когда средства выведения не имеют возможности выводить космические аппараты прямо на целевую орбиту.*

*Ключевые слова: довыведение космического аппарата, малая тяга, характеристическая скорость, низкая круговая орбита.*

## ANALYSIS OF THE ORBITAL CHANGE MANOEUVRES SATELLITE WHEN CONSTRUCTING A SATELLITE SYSTEM IN A LOW CIRCULAR ORBIT

I. K. Kolovsky\*, D. N. Shmakov

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: kolovigor@mail.ru

*The ballistic construction of a satellite system in a low circular orbit is investigated. The scheme of additional ascent of space vehicles to the target orbit from the storage orbit is analyzed. The problem is relevant in the case when launch vehicles do not have the ability to launch spacecraft directly into the target orbit.*

*Keywords: insertion of the satellite, low thrust, characteristic speed, low circular orbit.*

**Введение.** В работе изучается задача постановки малых КА (массой 40-50 кг) в заданную ячейку баллистической структуры спутниковой системы на низкой круговой орбите с определением периода времени для её решения. Задача имеет важное практическое значение для выведения КА на целевую орбиту с использованием двигательных установок малой тяги [1-2] в случае, когда средства выведения не имеют возможности выводить космические аппараты прямо на целевую орбиту.

**Построение спутниковой системы.** Рассматривается сценарий построения орбитальной группировки из 260 КА, в которой каждый КА размещается в одну орбитальную плоскость.

Развертывание системы осуществляется в два этапа. На первом этапе КА выводятся на орбиту хранения. На втором – на целевую орбиту. В качестве орбиты хранения принимается круговая орбита высотой 300 км и наклоном 60°. Целевая орбита – круговая с высотой 750 км и наклоном 60°. Формирование орбитальной группировки будет происходить двумя запусками по 130 КА.

**Довыведение КА.** Схема довыведения всех 130 КА следующая: КА выводятся на круговую орбиту хранения, происходит постановка КА в орбитальную плоскость целевой орбиты за счет времени ожидания на орбите хранения и затем реализуется маневр довыведения КА собственной двигательной установкой на высоту 750 км. Оценку затрат характеристической скорости для довыведения с одной круговой орбиты на другую круговую будем проводить по методике, которая рассмотрена в работе [3].

Для перевода КА с высоты 300 км на 750 км потребуется запас характеристической скорости равный 248 м/с. Для выработки указанного запаса топлива понадобится около 6,8 ч непрерывной работы двигательной установки. В качестве двигательной установки КА рассматривается электроракетный двигатель К50-10.1 или К50-10.5 [4]. Система ориентации и стабилизации КА ограничивает время работы двигателя 80 с на витке. Получается, что время на довыведение одного КА с высоты 300 км на 750 км составит 22 сут.

Главным моментом, на котором основывается постановка КА по разным плоскостям, является разность прецессий плоскостей на целевой орбите и орбите хранения. Величина разности прецессий

плоскостей задает угловую скорость смещения плоскостей [5]. Для получения большего разноса плоскостей КА должен дольше ожидать на орбите хранения.

В таблице приведены значения прецессии плоскости орбиты КА с наклоном  $60^\circ$  в зависимости от высоты.

**Прецессия плоскости орбиты КА с наклоном  $60^\circ$**

Тип орбиты	Высота орбиты, км	Прецессия, $^\circ$ /сут
Хранения	300	-4,24
Целевая	750	-3,37

В рассматриваемом случае величина разности прецессий равна  $0,87^\circ$ /сут. За один запуск КА будут размещаться по 130 плоскостям, разнесенных между собой на  $1,38^\circ$ . Время ожидания между началом подъема первого и второго КА составляет 1,6 сут. Именно за это время смещение плоскости на целевой орбите составит  $1,38^\circ$ . Суммарное время довыведения всех 130 КА на целевую орбиту составит 258 сут. Все время ожидания на орбите хранения потребует удержания КА на орбите. Важно, что последние несколько КА будут находиться в режиме ожидания довыведения около 200 сут. Тогда при средней солнечной активности для удержания КА на орбите хранения потребуется дополнительно 55 м/с характеристической скорости.

**Заключение.** Таким образом, указанная комплексная задача по формированию орбитальной группировки спутниковой системы на низкой круговой орбите, которая включает в себя удержание всех КА на орбите хранения и в тоже время поочередное довыведение КА на целевую орбиту, выглядит достаточно сложной. Данная задача требует дополнительной проработки в части выбора числа запускаемых КА, коррекций орбиты КА, выбора высоты орбиты хранения, времени ожидания на орбите хранения, запаса характеристической скорости.

#### Библиографические ссылки

1. Оптимизация схемы выведения космического аппарата с ограничениями по выбору интервалов включения двигательной установки / А.А. Авксентьев, В.И. Горбулин, Л.П. Зозуля и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ АО «Корпорация «ВНИИЭМ», М., 2012. том 130, № 5. С. 7-12.
2. Анпилогов В., Гриценко А. Оптимальные низкоорбитальные группировки // Журнал «Технологии и средства связи». изд. дом «Гротек», Москва, 2022. № S1. С. 44-47.
3. Оценка возможности проведения манёвра увода с рабочей орбиты космических аппаратов «Гонец-М» / И.К. Коловский; В.Н. Подолякин, Д.Н. Шмаков // Научно-технический журнал «Космонавтика и ракетостроение». АО «ЦНИИмаш», Королёв, 2018. № 2 (101). С. 107-113.
4. Обзор электроракетных двигателей с низкой потребляемой мощностью для корректирующих двигательных установок малых космических аппаратов / Вавилов И.С., Федянин В.В., Ячменев П.С. и др. // Проблемы машиноведения : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (17-19 марта 2020, г. Омск) : в 1 ч. / под ред. П.Д. Балакина ; Омский гос. технич. ун-т. Омск, 2020. Ч. 1. С. 236-248.
5. Эльясберг П. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. Изд. 4-е. М.: URSS, 2015. 544 с.

#### References

1. Avksentev A.A., Gorbulin V.I., Zozulya L.P., Chernyavsky V.A. Optimization of the spacecrafts output scheme with limitations for choosing engine start-up intervals // Problems of electromechanics. Essays of VNIEM JSC «Corporation «VNIEM», Moscow, 2012. vol. 130, № 5, pp. 7-12. (In Russ.)
2. Anpilogov V., Grizenko A. Optimal low-orbital groupings // Journal «Communication Technologies & Equipment». Groteck, Moscow, 2022. no. S1. pp. 44-47. (In Russ.)
3. Kolovsky I.K., Podolyakin V.N., Shmakov D.N. Evaluation of capability to perform deorbiting maneuver to take spacecraft «Gonets-M» from operating orbit // Scientific and technical journal «Cosmonautics and rocket engineering». JSC «TsNIIMash», Korolev, 2018. vol. 2 (101). pp. 107-113. (In Russ.)
4. Vavilov I.S., Fedyanin V.V., Yachmenev P.S., Zharikov K.I., Lukyanchik A.I., Stepen P.V. Overview of low-emissin electric rocket engines with low power consumption for small spacecraft. Materialy IV Mezhdunar. nauch-techn. conf. «Mechanical science and technology update» [Materials IV Intern. nauch-techn. Conf. «Mechanical science and technology update»]. Omsk, 2020, vol. 1, pp. 236-248. (In Russ.)
5. El'yasberg P. *Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennogo sputnika Zemli* [Introduction to the theory of flight satellite]. Moscow, URSS Publ., 2015, 544 p.

УДК 629.7.05

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПО КАНАЛУ КРЕНА СТУДЕНЧЕСКОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РАКЕТЫ

В. В. Майоров\*, Г. А. Чепель, А. Ю. Демина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

\*E-mail: viktor.majorov.01@mail.ru

*Рассмотрена проблема разработки узла стабилизации угловой скорости по каналу крена студенческой экспериментальной ракеты. Вынесены результаты расчета шарнирного момента органов управления, представлена величина момента крена, алгоритм работы узла стабилизации и приведены результаты. Предложено конструктивное исполнение.*

*Ключевые слова: система стабилизации, экспериментальная модель ракеты, угловая скорость, крен.*

## DESIGN OF STABILIZATION SYSTEM OF ANGULAR VELOCITY ALONG THE ROLL CHANNEL OF A STUDENT EXPERIMENTAL ROCKET

V. V. Mayorov\*, G. A. Chepel, A. Yu. Demina

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: viktor.majorov.01@mail.ru

*The problem of development of the roll channel angular velocity stabilization node as a part of the flight control system of the student's experimental rocket. The results of calculating the of the hinge moment of aerodynamic controls are presented, the equation and value of the roll moment, the algorithm of the stabilization node operation are presented and the results are given. The structural design is proposed.*

*Key words: stabilization system, experimental rocket, angular velocity, roll.*

Перед участниками студенческого конструкторского бюро «RocketLAV» стояла проблема, связанная с недостатком и, в некоторых ситуациях, избытком стабильности на пассивном участке полета экспериментальных ракет (ЭР) [1]. В качестве решения, командой объединения было предложено разработать новую модель ЭР в рамках всероссийского конкурса «Линия Кармана». Была поставлена задача – включить в ее состав узел системы стабилизации угловой скорости (ССУС) по каналу крена, который мог бы обеспечить поддержание данной величины на уровне заданного значения.

После анализа существующих схем расположения органов управления в экспериментальных ракетах из мирового опыта было принято решение расположить узел непосредственно в центре давления аппарата. Расчет по исходным данным для проекта показал, что величина максимального шарнирного момента для данного расположения органов управления будет равняться 5,76 Нм [2].

Зависимость максимального момента крена, создаваемого парой рулей (угол отклонения рулей  $\delta = 15^\circ$ ) от времени полёта представлена на рис. 1.

Система управления полетом (СУП) будет непрерывно получать данные о высоте и скорости полета с приёмника воздушного давления (ПВД), данные с инерционных датчиков: барометра и акселерометра на плате управления ЭР.

Дополнительно контролировать полет будут датчики углов атаки и датчики статического давления с поверхности аппарата. В совокупности с ними на микроконтроллер системы будет поступать информация с инерционных датчиков, осуществляющих измерение углового положения ЭР по углам

тангажа и рыскания. При существенном изменении данных углов (от 0 до  $\pm 55$  градусов) рули будут переведены в нулевое, тарированное положение.

Краткая реализация алгоритма работы выглядит следующим образом: управляющий микроконтроллер опрашивает все сенсорные устройства, анализирует полученные данные, производит вычисление угла, на который необходимо повернуть рули для создания противоположного по знаку момента, противоположного закручивающему ЭР вдоль продольной оси, выдает на выход управляющий сигнал для сервопривода. Данные расчёты повторяются с частотой опроса микроконтроллера датчиков согласно ограничением устройства и управляющего алгоритма до конца работы системы.

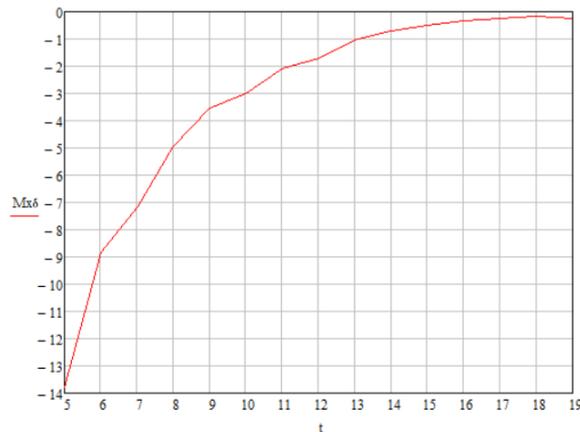


Рис. 1. Зависимость максимального момента крена, создаваемого органами управления от текущего времени полёта ( $\delta = 15^\circ$ )

На основе алгоритма работы была создана модель в программе Simulink [3–4], имитирующая работу ССУС [5]. Модель представлена на рис. 2.

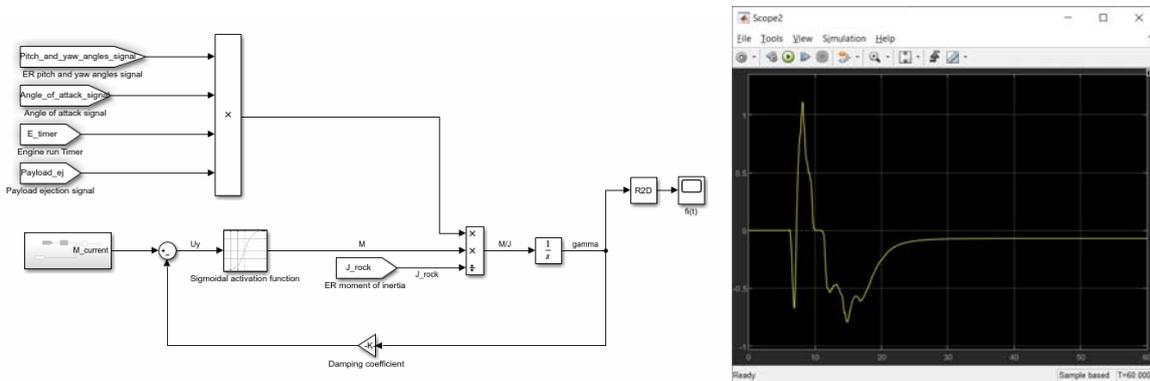


Рис. 2. Структурная схема ССУС по каналу крена и результаты моделирования

При симуляции строится график, иллюстрирующий зависимость текущей угловой скорости ЭР по каналу крена (град/с) от времени полёта. Данная зависимость имеет характер затухающих колебаний, что свидетельствует об устойчивости системы управления [6–7].

Основная задача узла заключается в повышении момента вращения сервопривода с заявленной изготовителем (2 Нм) в 9 раз до (18 Нм). Конструктивное решение обеспечивается применением редуктора [8] с передаточным отношением  $i = 9$  [9]. Зубчатые колеса редуктора выполнены на фотополномерном 3D принтере для увеличения качества компонентов. Корпус вырезан на фрезерном ЧПУ станке.

Материалы выбраны из учета работы в паре трущихся поверхностей. Конструкция корпуса представляет собой набор фланцев произвольной формы, образующих разъемное соединение. Система оснащена механическим ограничителем и переменным резистором предупреждающими поворот руля на угол больший заданного (рис. 3, 4).

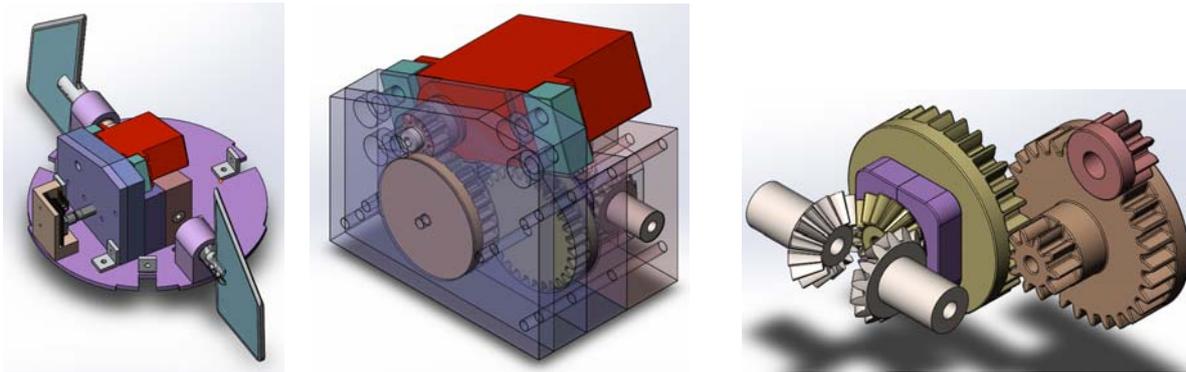


Рис. 3. Редуктор



Рис. 4. Конструкционное исполнение ССУС

По окончании работы над проектом студенческий коллектив выполнил поставленную задачу и в настоящее время проводятся испытания работы узла в полёте на борту экспериментальной ракеты «Capella LCS – Legion».

#### Библиографические ссылки

1. Майоров В.В., Демина А. Ю., Фадеенков П.В. Разработка экспериментальной модели ракеты «Capella-M» с целью развития профессиональных навыков студентов // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2021, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2021. С. 36–37.
2. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полёта беспилотных летательных аппаратов // учебное пособие для вузов / изд. 2-е, переработанное и доп. М.: Издательство “Машиностроение”, 1973. 616 с.
3. Документация [Электронный ресурс]. // Сайт «Экспонента». URL: <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/fopen.html> (дата обращения: 22.07.2022).
4. Help center [Электронный ресурс]. // Сайт «MathWorks». URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/data-types.html> (дата обращения: 22.07.2022).
5. Дж Г. Блейклок, автоматическое управление самолетами и ракетами / перевод с английского под редакцией д-ра техн. Наук проф. Н.Т. Кузовкова Москва “Машиностроение” Москва 1969. 286 с.
6. Гусев А.Н., Ишков С.А. Основы теории автоматического управления: Учеб. пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2005 164 с.
7. Давыдов, И.Е. теория автоматического управления [Электронный ресурс]: интерактивное мультимедийное пособие / И.Е. Давыдов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т). Электрон. текстовые и граф. дан. (1,35 Мбайт). Самара 2011. 1 эл. опт. диск (CD-ROM). Систем. требования: ПК Pentium; Windows 98 или выше.

8. Мамаев А. Н., Балабина Т. А. Теория механизмов и машин учебник для вузов // Учебник для вузов М.: Издательство “Экзамен”, 2008. 254 с.
9. Савинов А. П., Ястребов В.М. ТММ в авиастроении // учебное пособие / Под редакцией д-ра техн. наук, проф. В. Н.Самсонова. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара 2006. 173 с.

### References

1. Mayorov V. V., Demina A. Y., Fadeenkov P.V. Development of experimental model of rocket "Capella-M" with the purpose of development of professional skills of students // Reshetnev readings: proceedings of XXV International Scientific Conference (10-12 November 2021, Krasnoyarsk) : in 2 parts / in general ed. Krasnoyarsk, 2021. P. 36-37.
2. Lebedev A. A., Chernobrovkin L.S. Flight Dynamics of Unmanned Aerial Vehicles // textbook for universities / ed. M.: Mashinostroenie Publisher, 1973. 616 с.
3. Documentation [Electronic resource]. // Site "Exponenta". URL: <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/fopen.html> (access date: 22.07.2022).
4. Help center [Electronic resource]. // MathWorks site. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/data-types.html> (date of access: 22.07.2022).
5. G.G. Blakelok, The automatic control of aircraft and missiles / translated from English under the editorship of Doctor of Technical Sciences prof.N.T. Kuzovkov Moscow "Machine Building" Moscow 1969 286 p.
6. Gusev A. N., Ishkov S.A. Fundamentals of Automatic Control Theory: Textbook / Samara State Aerospace University. Samara, 2005. 164 p.
7. Davydov I. E. Automatic control theory [Electronic resource]: interactive multimedia tutorial / I. E. Davydov; Ministry of Education and Science of Russia, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev (National Research University). Electronic text and graphic data. (1.35 Mbyte). Samara 2011. 1 CD-ROM. System. requirements: Pentium PC; Windows 98 or higher.
8. Mamaev, A. N.; Balabina, T.A. Theory of Mechanisms and Machines Textbook for High Schools (in Russian) // Textbook for High Schools M.: Publishing house "Examen", 2008. 254 p.
9. Savinov A.P., Yastrebov V.M. TMM in aircraft engineering // textbook / edited by Dr. of Technical Sciences, prof. Samara State Aerospace University. Samara 2006. 173 p.

© Майоров В. В., Чепель Г. А., Демина А. Ю., 2022

УДК 629.7.01

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРОНШТЕЙНА КРЕПЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО БЛОКА  
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА  
ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

М. Е. Марчук\*, А. И. Лыкум, И. О. Надеин, К. С. Кустов

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: mmarchuk98@mail.ru

*Снижение массы космического аппарата является актуальной задачей в космическом строении. Одним из методов снижения массы является топологическая оптимизация. Она позволяет уменьшить массу детали без потери прочностных характеристик.*

*Ключевые слова: кронштейн, топологическая оптимизация, снижение массы, проектирование.*

**DESIGN OF THE MOUNTING BRACKET OF THE OPTICAL UNIT  
OF THE SPACE VEHICLE USING THE METHOD  
OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION**

M. E. Marchuk\*, A. I. Lykum, I. O. Nadein, K. S. Kustov

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: mmarchuk98@mail.ru

*Reducing the mass of a spacecraft is an urgent task in the space industry. One of the mass reduction methods is topological optimization. It allows you to reduce the weight of the part without losing strength characteristics.*

*Keywords: bracket, topological optimization, weight reduction, design.*

В работе представлен результат проектирования кронштейна космического аппарата (КА) использованием топологической оптимизации, которая является математическим методом, для определения наиболее эффективной компоновки материала при заданных ограничений и условий нагрузки [1].

Задача топологической оптимизации (ТО) в классической постановке – нахождение оптимального с точки зрения жесткости распределения материала в заданной области при заданных нагрузках. При этом область была разделена на пространство оптимизации и на неизменные (фиксированные) подобласти, которые не будут оптимизированы [2]. Все операции, связанные с оптимизацией выполнены в САЕ/САО/САМ системе solidThinking Inspire 2018.3 [3].

В качестве изделия для оптимизации был выбран типовой кронштейн из конструкции КА, изготавливаемый из материала Д16.ПП [4]. На него установлен блок полезной нагрузки. Конструкция кронштейна показана на рис. 1.

На основе распределения материала после топологической оптимизации в программах solidThinking Inspire 2018.3 и прочностного анализа Simcenter Femap 2021.2, была спроектирована новая геометрическая модель кронштейна в CATIA V5 R24 (рис. 2).

Первая собственная частота оптимизированного кронштейна составляет 289 Гц, что превышает требование  $\geq 150$  Гц, соответственно требование по жесткости удовлетворено. В табл. 1 приведены минимальные (из всех расчетных случаев и от всех необходимых видов воздействия) значения запаса прочности для оптимизированного кронштейна и соответствующие им расчетные значения напряже-

ний. Прочность кронштейна является достаточной при запасе прочности  $\geq 1$  [5]. Конечно-элементная модель оптимизированного кронштейна показана на рис. 3.

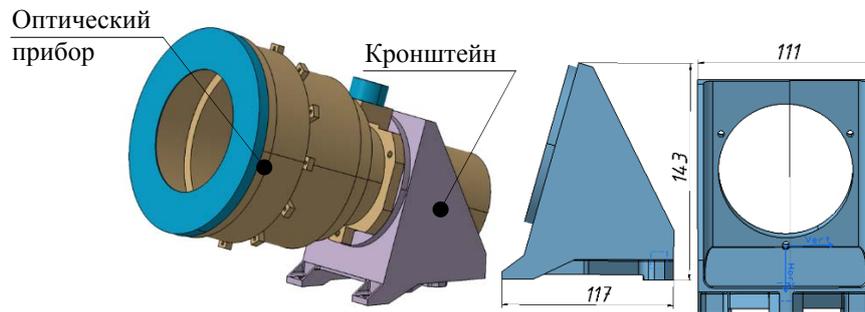


Рис. 1. Кронштейн в компоновке с прибором и его габаритные размеры

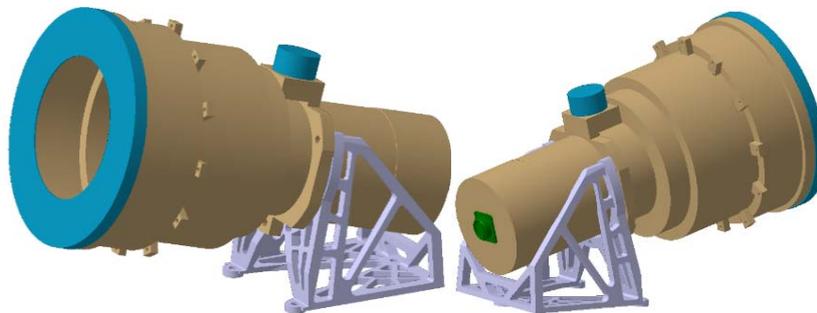


Рис. 2. Оптимизированный кронштейн с оптическим прибором

Таблица 1

Значения запасов прочности оптимизированного кронштейна

Вид воздействия	Критерий оценки	Допускаемые напряжения, МПа	Максимальное значение, МПа	Минимальный запас прочности
Квазистатическая нагрузка	По Фон – Мизесу	325	66,0	4,9
Широкополосная случайная вибрация			277,9	1,2
Тепловое воздействие			0,1	>1

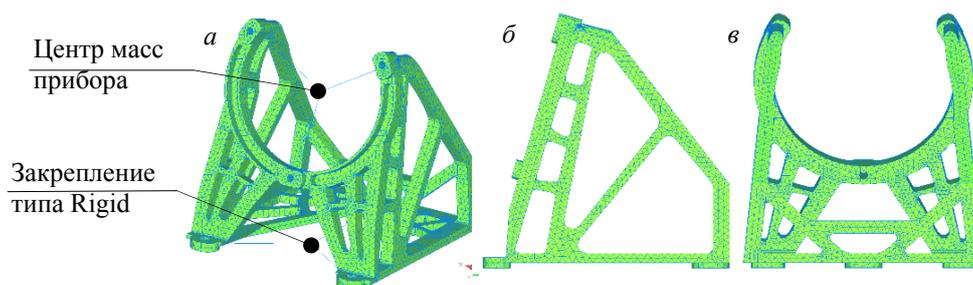


Рис.3. Конечно-элементная модель оптимизированного кронштейна  
*a* – изометрический вид, *б* – вид сбоку, *в* – вид сзади

Сравнение масс показано в табл.2.

Таблица 2

Сравнение масс кронштейнов

Вид кронштейна	Масса, кг
Исходный кронштейн	0,423
Оптимизированный кронштейн	0,243

Оптимизированный кронштейн при соблюдении требований к его механическим характеристикам, полученный в результате ТО и проектирования, обеспечивает снижение массы в 1,74 раза.

#### Библиографические ссылки

1. Проектирование кронштейна крепления оптического солнечного датчика космического аппарата с использованием топологической оптимизации / Шапошников С.Н., Кишов Е.А., Зимнякова Л.Д. // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника 2021. №66. С. 98-1-5.
2. BelAstro.Net: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sat.belastro.net/glava2/glava2.php> (дата обращения 04.07.2022).
3. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М. : ДМК Пресс, 2015. 562 с.
4. ГОСТ 21488-97. Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. = Bars pressed from aluminum and aluminum alloys: межгосударственный совет: принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 21.10.1997 г. №12-97.
5. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

#### References

1. Designing the mounting bracket for an optical solar sensor of a spacecraft using topological optimization / Shaposhnikov S.N., Kishov E.A., Zimnyakova L.D. // Bulletin of PNRPU. Aerospace Engineering 2021. №66. P. 98-105.
2. BelAstro.Net: [Electronic resource]. URL: <http://www.sat.belastro.net/glava2/glava2.php> (accessed 07/04/2022).
3. Alyamovsky A. A. SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations. M. : DMK Press, 2015. 562 p.
4. GOST 21488-97. Bars pressed from aluminum and aluminum alloys. = Bars pressed from aluminum and aluminum alloys: interstate council: adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification of 10/21/1997 № 12-97.
5. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. Fundamentals of designing information support spacecraft: textbook. allowance / Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.

© Марчук М. Е., Лыкум А. И., Надеин И. О., Кустов К. С., 2022

УДК 621.31

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ВРЕМЕНИ ЗАРЯДА ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. А. Петрушкин, Ю. А. Кремзуков

Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики  
Томского университета систем управления и радиоэлектроники  
Российская федерация, 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53  
E-mail: an.petrushkin@yandex.ru

*В данной работе представлена имитационная модель, разработанная в программе MATLAB Simulink, для исследования влияния величины зарядного тока на время заряда литий-ионной аккумуляторной батареи.*

*Ключевые слова: система генерирования электроэнергии, малый космический аппарат, литий-ионная аккумуляторная батарея, MATLAB.*

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR CHECKING THE CHARGING TIME OF A LITHIUM-ION BATTERY FOR THE SPECIFIED LOAD CYCLOGRAMS OF A SMALL SPACE VEHICLE

A. A. Petrushkin, U. A. Kremzucov

Research Institute of Automation and Electromechanics  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
53, Belinskogo Str., Tomsk, 634034, Russian Federation  
E-mail: an.petrushkin@yandex.ru

*This paper presents a simulation model developed in the MATLAB Simulink program to study the effect of the charging current on the charge time of a lithium-ion battery.*

*Keywords: power generation system, small spacecraft, lithium-ion battery, MATLAB.*

**Введение.** Система генерирования энергии (СГЭ) является одной из важнейших систем космического аппарата (КА). Она представляет собой совокупность первичных и вторичных источников энергии, энергопреобразующей аппаратуры и необходимой автоматикой контроля и управления. В качестве вторичных источников энергии для питания бортовых потребителей на теневых участках орбиты и при пиковых нагрузках чаще всего используются аккумуляторные батареи (АБ) [1].

На космических аппаратах, эксплуатируемых на низкой околоземной орбите, в настоящее время отдают предпочтение использованию литий-ионным аккумуляторным батареям (ЛИАБ). Это обусловлено тем, что данный тип батарей обладает высокой удельной энергией и высоким энергетическим КПД. Основные характеристики ЛИАБ приведены в табл. 1 [2].

Работоспособность, штатное функционирование и срок активного существования (САС) спутника в значительной степени зависит от правильного расчета и выбора АБ. Ключевым параметром батареи является ее емкость, которая определяется продолжительностью теневых участков на рабочем витке [2, 3]. В ходе эксплуатации АБ малого космического аппарата (МКА) за один виток подвергается минимум одному циклу заряда-разряда на каждом витке полета. Таким образом, за время пока аппарат находится на освещенном участке орбиты, батарея должна приобрести такое количество энергии, чтобы ее было достаточно для питания спутника на затененном участке орбиты.

Работоспособность, штатное функционирование и срок активного существования (САС) спутника в значительной степени зависит от правильного расчета и выбора АБ. Ключевым параметром батареи является ее емкость, которая определяется продолжительностью теневых участков на рабочем витке

[2, 3]. В ходе эксплуатации АБ малого космического аппарата (МКА) за один виток подвергается минимум одному циклу заряда-разряда на каждом витке полета. Таким образом, за время пока аппарат находится на освещенном участке орбиты, батарея должна приобрести такое количество энергии, чтобы ее было достаточно для питания спутника на затененном участке орбиты.

Таблица 1

## Основные характеристики аккумуляторных батарей

Энергетический КПД, %	92
Саморазряд, % за сутки	от 0,3 до 0,5
Температура циклирования, °С	от +5 до +35
Критерий заряженности	Напряжение
Устойчивость к перезаряду и переразряду	–
Сложность выравнивания аккумуляторов	+
Начальная удельная энергия, Втч/кг	от 100 до 25
Глубина разряда для выполнения циклического ресурса (~30000 циклов)	30%

Классический принцип заряда литий-ионной АБ состоит из двух этапов. На первом этапе заряд осуществляется номинальным постоянным током, который измеряется в долях от номинальной емкости  $C_n$ . Для нормальной работы аккумулятора зарядный ток должен составлять 0,2 до 0,5 от  $C_n$ . Для ускоренной зарядки необходимо 0,5 до 1  $C_n$  [4, 5].

Таким образом, помимо выбора емкости батареи перед разработчиком стоит задача выбора оптимального зарядного тока, при котором батарея на освещенном участке орбиты успеет приобрести необходимый заряд. Для исследования влияния величины тока заряда АБ на продолжительность заряда в программе MATLAB Simulink была разработана имитационная модель. Данная модель представлена на рис. 1.

Для исследований была выбрана батарея фирмы ПАО Сатурн ЛИГП-48. Параметры АБ ЛИГП-48 представлены в табл. 2.

В результате моделирования были получены зарядные и разрядные характеристики батареи при различных значениях тока, которые приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

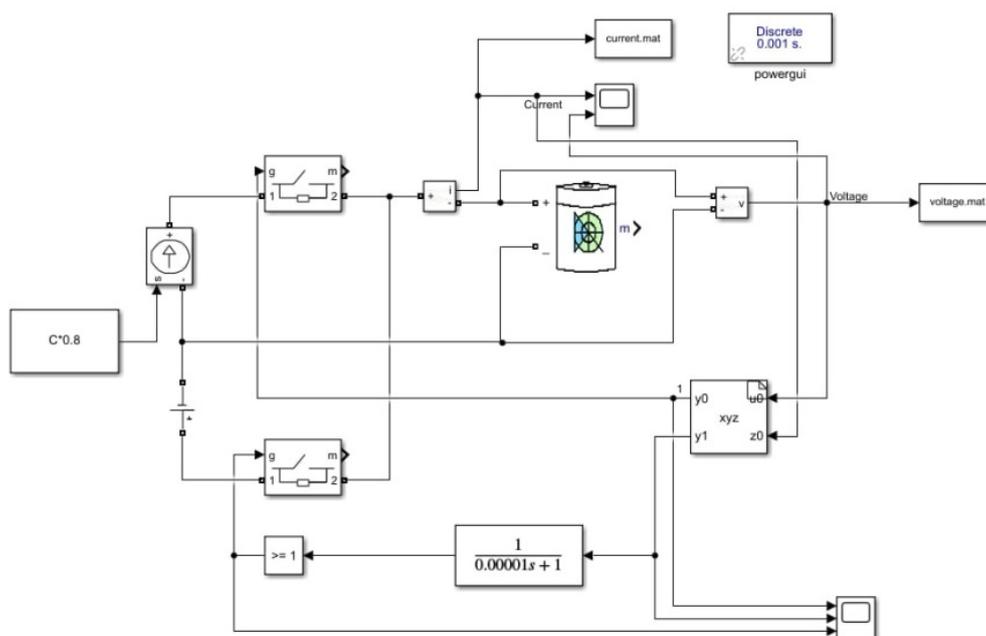


Рис. 1. Имитационная модель для снятия зарядных и разрядных характеристик ЛИАБ, собранная в MATLAB Simulink

Параметры аккумуляторной батареи ЛИГП-48

Наименование	Номинальная емкость, А·ч	Удельная энергия, (Вт·ч)/кг
ЛИГП-48	55	154

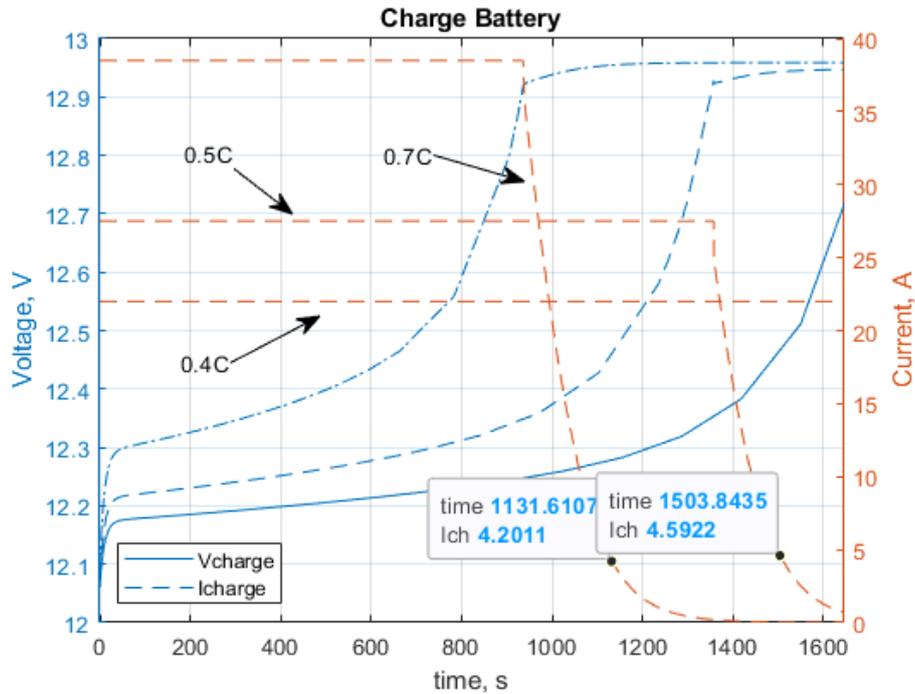


Рис. 2. Характеристики заряда батареи ЛИГП-48

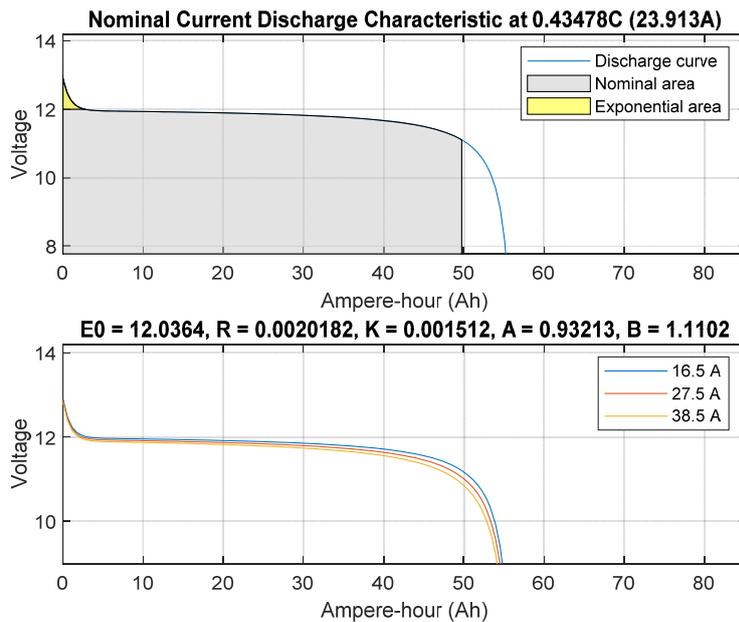


Рис. 3. Разрядные характеристики ЛИГП-48

В результате данной работы в программе MATLAB Simulink была получена имитационная модель для получения зарядных и разрядных характеристик ЛИАБ. Это позволяет разработчику без сложных расчетов оценить время заряда батареи при заданной величине зарядного тока.

### Библиографические ссылки

1. Шиняков Ю. А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // Известия ТПУ. 2006. №8.
2. Дыбля Ю.В., Крылова О.С., Яковлев К.В. Расчёт аккумуляторных батарей космических аппаратов спутниковой системы связи на низкой круговой орбите // Инновационная наука. 2020. №4.
3. Хромов, А.В. Литий-ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов // Космическая электромеханика. Космические аппараты. Исследование околоземного космического пространства. 2016. 20 с.
4. S. Ananda, N. Lakshminarasamma, V. Radhakrishna, M. S. Srinivasan, P. Satyanarayana and M. Sankaran, "Generic Lithium ion battery model for energy balance estimation in spacecraft, 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018, P. 1-5.
5. R. Bugga, M. Smart, J. Whitacre and W. West, "Lithium Ion Batteries for Space Applications, 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007, pp. 1-7.

### References

1. Shinyakov Yu. A. Energy analysis of structural diagrams of power supply systems for automatic spacecraft. Izvestiya TPU. 2006. No. 8.
2. Dyblya Yu.V., Krylova O.S., Yakovlev K.V. Calculation of storage batteries for satellite communication systems in low circular orbit. Innovatsionnaya nauka. 2020. № 4.
3. Khromov, A.V. Lithium-ion batteries for low-orbit spacecraft // Space Electromechanics. Space vehicles. Exploration of near-Earth space, 2016, P. 20.
4. S. Ananda, N. Lakshminarasamma, V. Radhakrishna, M. S. Srinivasan, P. Satyanarayana and M. Sankaran, "Generic Lithium ion battery model for energy balance estimation in spacecraft, 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018, P. 1-5.
5. R. Bugga, M. Smart, J. Whitacre and W. West, "Lithium Ion Batteries for Space Applications, 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007, P. 1-7.

© Петрушкин А. А., Кремзуков Ю. А., 2022

УДК 629.783

## СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ БЕСКЛЕЕВЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. Ю. Похабов<sup>1,2\*</sup>, А. А. Иконникова<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>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52

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

*Современные космические аппараты должны отвечать существующим мировым тенденциям по снижению массы конструкции и как следствие увеличение массы полезной нагрузки, выводимой на орбиту. Предлагаемым решением по снижению массы конструкции КА на основе трехслойных конструкций является уменьшение массовой доли клея в клеевых соединениях конструктивных элементов без потери прочности и жесткости.*

*Ключевые слова: трехслойная панель, силовая конструкция космического аппарата*

## METHOD FOR MANUFACTURING HONEYCOMB FILLER BY GLUE-FREE METHOD FOR PRODUCING THREE-LAYER STRUCTURES

A. Yu. Pokhabov<sup>1,2\*</sup>, A. A. Ikonnikova<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> Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»

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

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

*Modern spacecraft must meet the current global trends in reducing the mass of the structure and, as a result, an increase in the mass of the payload put into orbit. Suggested solution to reduce*

*The weight of the spacecraft structure based on three-layer structures is to reduce the mass fraction of glue in the adhesive joints of structural elements without loss of strength and rigidity.*

*Keywords: three-layer panel, power structure of the spacecraft*

Большинство современных космических аппаратов изготавливаются из трехслойных сотовых конструкций [1-5]. Трехслойная панель представляет собой слоистую конструкцию из двух несущих слоев и сотового заполнителя, который соединяют с обшивками с помощью клея [6].

Большеразмерный сотовый заполнитель составляют из набора сотовых блоков, соединенных между собой по стыку боковых граней с помощью клеевой композиции. При изготовлении сотовых панелей с габаритными размерами свыше 1200x400 мм существует необходимость соединения блоков сотового заполнителя в единое полотно, определяемое габаритными размерами обшивок. Для уменьшения количества стыков (снижения массовой доли клея) сотовые блоки изготавливают прямоугольными с максимально возможными габаритными размерами. При этом остаются остатки от сотовых блоков, которые подлежат утилизации.

В данном способе изготовления сотового заполнителя сотовые блоки в зоне стыка соединяют с помощью крепежных деталей из сотового заполнителя изготовленных в виде шпонки. Места установки шпонок и кромки сотовых блоков предварительно подвергают механической обработке, обеспечивающей плотное сопряжение шпонок с соединяемыми блоками между собой. Плотное соедине-

ние образуется за счет разности технологических допусков у обрабатываемых кромок сотовых блоков и шпонок. Если посадка в местах соединения сотовых блоков будет с зазором или переходная, то это может привести к:

- увеличению габаритных размеров (расползанию) сотовых блоков, после его установки на обшивку сотовой панели, что нарушает геометрию сотовой панели;
- уменьшению прочности и жесткости сотовой панели в зазорах стыка сотовых блоков между собой и образованию дефектов, таких как непроклеи сотовой панели, образование вмятин и т. п., что также приводит к снижению прочностных характеристик сотовой панели. Пример бесклевого соединения сотовых блоков между собой представлен на рис. 1.

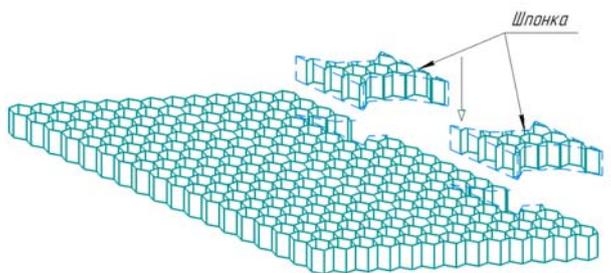


Рис. 1. Бесклевое соединение сотовых блоков

Преимущества бесклевого соединения сотового заполнителя:

1. Снижается массовая доля клея в силовой конструкции КА за счет исключения клеевой пленки.
2. Уменьшается стоимость изготовления трехслойных сотовых конструкций за счет исключения дорогостоящей клеевой пленки.
3. Исключаются нетехнологичные операции с клеевой пленкой при изготовлении полотна из сотового заполнителя, которые заменяются на автоматизированную механическую обработку кромок сотовых блоков, что снижает стоимость его изготовления.
4. Снимается ограничение на количество стыков сотовых блоков между собой, что приводит к рациональному использованию сотового заполнителя и уменьшению доли материальных затрат.
5. Появляется возможность соединения сотовых блоков полигональной формы, что также приводит к рациональному использованию сотового заполнителя и уменьшению доли материальных затрат.
6. Появляется возможность использования остатков сотовых блоков на изготовление шпонок, что также приводит к рациональному использованию сотового заполнителя и уменьшению доли материальных затрат.

Заявленные характеристики предлагаемой технологии подтверждены расчетами и изготовлением опытного образца (рис. 2).

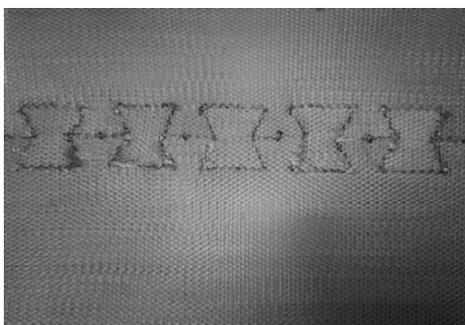


Рис. 2. Опытный образец

Снижение массы конструкций из трехслойных панелей подтверждают расчеты используемой клеевой композиции для изготовления сотовых панелей космических аппаратов на базе платформы среднего класса («Экспресс-1000»). Минимизация остатков сотового заполнителя при изготовлении

трехслойных панелей обеспечивается за счет того, после выкладки сотовых блоков на обшивке и обрезки технологических припусков остатки

используются для изготовления шпонок. Кроме того, забракованные после растяжки сотовые блоки при использовании бесклеевой технологии после обрезки дефектной области могут быть применены для изготовления сотового полотна в качестве негабаритных блоков. (т. к. не существует необходимости в минимизации количества стыков сотовых блоков). Это может привести к снижению остатков сотового заполнителя.

Использование бесклеевого соединения сотового заполнителя при изготовлении длинномерных сотовых панелей позволяет снизить массу панели, при этом повышается технологичность (уменьшается время изготовления) и уменьшается стоимость изготовления сотовых панелей за счет исключения дорогостоящей клеевой пленки.

### Библиографические ссылки

1. Пат. 2658262 РФ. В64G 1/22 ; В64G 1/1007. Способ сборки космического аппарата / Похабов А.Ю., Биндокас К.А., Савицкий В.В. /заявитель АО «ИСС». № 2017106693; заяв. 28.02.2017; опубл. 19.06.2018 Бюл. № 17
2. Пат. 2729148 РФ. В64G 1/22; В64G 1/10. Модуль полезной нагрузки космического аппарата / Похабов А.Ю., Биндокас К.А., Савицкий В.В. и др. /заявитель АО «ИСС». № 2019142675; заяв. 20.12.2019; опубл. 04.08.2020 Бюл. № 22
3. Пат. 2753003 РФ. В64G 1/10. Модуль служебных систем космического аппарата / Похабов А.Ю., Марцинкевич Т.Н., Савицкий В.В. /заявитель АО «ИСС». № 2020131543; заяв. 25.09.2020; опубл. 11.08.2021 Бюл. № 23
4. Пат. 2771087 РФ. В64G 1/10. Способ сборки модуля полезной нагрузки космического аппарата / Похабов А. Ю., Иванов Е. А., Наговицин В.Н. и др. /заявитель АО «ИСС». № 2021132663; заяв. 10.11.2021; опубл. 26.04.2022 Бюл. № 12
5. Применение конструкций сотовых панелей в космических аппаратах / Иванов Е. А., Иконникова А. А., Клешина И. А. и др. // Инженерный журнал: науки и инновации. 2022. № 5 (125). С. 1–14.

### References

1. Pokhabov A. Yu., Bindokas K. A., Savitsky V. V. Spacecraft assembly method. Patent RF, no.2658262, 2018.
2. Pokhabov A. Yu., Bindokas K. A., Savitsky V. V. Spacecraft payload module. Patent RF, no. 2729148, 2019.
3. Pokhabov A. Yu., Martsinkevich T. N., Savitsky V.V. Spacecraft Service Systems Module. Patent RF, no. 2753003, 2020.
4. Pokhabov A. Yu., Ivanov E.A., Nagovitsin V. N. A method for assembling a spacecraft payload module. Patent RF, no. 2771087, 2021.
5. Ivanov E.A., Ikonnikova A.A., Kleshnina I.A. [Application of honeycomb panel structures in spacecraft]. Engineering Journal: Science and Innovations. 2022. no. 5 (125). p. 1–14. (In Russ.).

© Похабов А. Ю., Иконникова А. А., 2022

УДК 656.7.022.816

## АВИАТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

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

*Формирование городской транспортной среды в версии 3D на основе использования авиатранспортных средств вертикального взлета-посадки нового поколения, использующих крыльчатые движители цилиндрического вида.*

*Ключевые слова: транспортная среда, авиатранспортное средство, крыльчатый движитель.*

## AIR TRANSPORT MEANS OF NEW OPPORTUNITIES

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 formation of the urban transport environment in the 3D version based on the use of a new generation of vertical take-off and landing air transport vehicles using cylindrical wing propellers.*

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

Существующие современные транспортные проблемы, которые имеются на территориях крупных городов на всех континентах планеты, четко выявили определенную проблему. Она заключается в том, что плоскостная транспортная инфраструктура исчерпала возможности своего дальнейшего развития. Можно говорить о том, что транспортные средства и в целом инфраструктура наземного и водного транспорта практически достигли максимального уровня своего совершенства. Поэтому и достаточно сложно решать возникающие проблемы транспортной доступности особенно в городских агломерациях.

Это подтверждается, в частности, реакцией государственных структур и бизнеса на существующие транспортные проблемы. Они еще в 90-х годах XX века значительно увеличили вложения в исследования связанных с разработкой персональных авиатранспортных средств (персональный вертолет, авиолет, летающий автомобиль, аэромобиль и т. д.).

В настоящее время в российских городах сосредоточено практически до 73 % всего населения и у них точно такие же проблемы, что и в городах за рубежом. При этом необходимо учитывать, что в России огромная территория почти безлюдна. Все это создает проблемы связанные с перспективами развития пространственной организации страны в будущем [1].

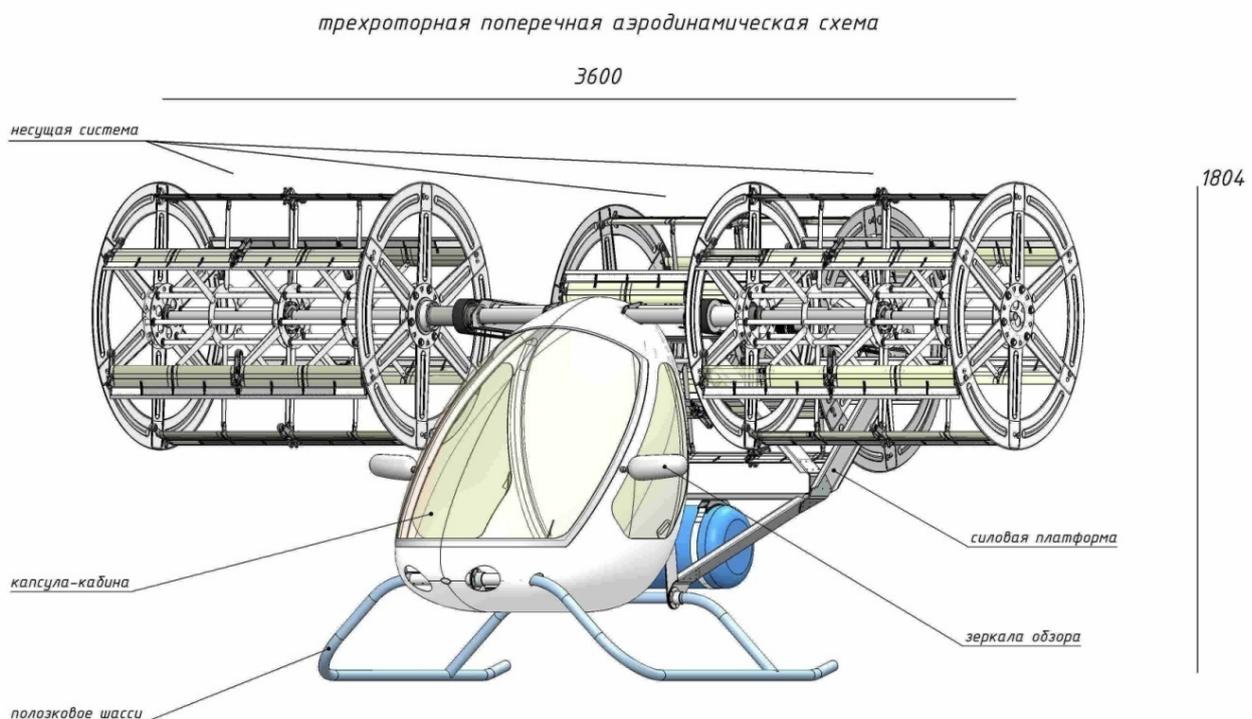
Для решения транспортного обустройства Российской Федерации в XXI веке, очевидной необходимостью является более широкое использование потенциала воздушного пространства. Реализация данного потенциала возможна на основе применения новых массовых авиатранспортных средств внеаэродромного базирования, что и позволит сформировать основы транспортной среды 3D в стране.

Одним из таких транспортных средств может являться использование нового типа авиатранспортного средства вертикального-взлета посадки (АТС ВВП), с несущей системой крыльчатых движителей цилиндрического вида. При этом необходимо отметить, что сама идея не нова. Работы по созданию такого авиатранспортного средств с различной степенью успешности велись еще с начала XX века, как в России, так и за ее пределами [2–3].

В 90-х годах прошедшего столетия данное направление в авиационной технике получило новый импульс своего развития. Работы начались активно проводится, как внутри России, так и за рубежом, в том числе в Республике Южная Корея, Китае, Европейском Союзе, США и ряде других стран. Уже сейчас разработчиками спроектированы, построены и испытаны ряд прототипов АТС ВВП с несущей системой крыльчатых движителей цилиндрического вида. Все это позволяет сделать вывод о перспективности данного направления авиастроения [4-5].

В городе Красноярске данные работы начиная с 1993 года ведутся специалистами научно-исследовательской группой «Арей» (НИГ «Арей»). В процессе проведения НИОКР научно-исследовательской группой «Арей» был предложен концептуальный образ летательного аппарата получившей условное название «Циклолет». Он имеет трехроторную аэродинамическую схему, где между двумя передними цилиндрическими роторами расположена капсула-кабина, оснащенная ползковым шасси.

Третий цилиндрический ротор находится в кормовой части капсулы-кабины. Управление эволюциями аппарата, обеспечивается эксцентриковым механизмом, изменяющим направление векторов тяги цилиндрических роторов (см. рисунок) [6].



АТС ВВП «Циклолет» с несущей и тяговой системой на основе крыльчатых движителей

НИГ «Арей» на основе стендовых испытаний АТС ВВП «Циклолет» были получены определенные летные характеристики. К ним можно отнести, в том числе: возможность причаливания к вертикальным плоскостям; возможность парковки на контрфорсах зданий, решетчатых платформах любого уровня высоты; низкая шумность; высокая точность посадки при сильном внешнем возмущении, среды при котором отклонение составит не более 1 метра; высокая устойчивость и способность управления при скорости ветра до 20 м/сек; вертикальная скороподъемность до 10 м/сек; диапазон скоростей в горизонтальном полете от 0 до 200 км/час с дальностью свыше 300 километров; общий ресурс эксплуатации свыше 5000 часов и наработкой на отказ основных элементов свыше 2000 часов.

Полученные характеристики позволяют говорить о том, что АТС ВВП «Циклолет» может в будущем являться одним из элементов при формировании транспортной среды 3D в городах, как в Российской Федерации, так и в мире. Кроме того, уникальные его летные возможности позволяют говорить о применении данного летательного аппарата силовыми ведомствами страны.

### Библиографические ссылки

1. Википедия. Свободная энциклопедия. Население Земли [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Население\\_Земли](https://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Земли) (дата обращения: 27.07.2022).
2. Циклокоптер [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклокоптер#:~:text=«Самолёт»%20Сверчкова.%20Первый%20аппарат%20С%20иногда,цикложиром%20или%20циклокоптером%20достаточно%20условно> (дата обращения: 01.08.2022).
3. Ротоплан [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rotoplan.narod.ru/history.htm> (дата обращения: 13.07.2022).
4. Программа разработки циклолётов «Циклон». Новая реализация старой идеи. Военное обозрение. [Электронный ресурс]. URL: <https://topwar.ru/184287-programma-razrabotki-cikloletov-ciklon-novaja-realizacija-staroj-idei.html?> (дата обращения: 01.08.2022).
5. Денис Воронин . D-Dalus летательный аппарат нового поколения. [Электронный ресурс]. URL: <https://craftster.ru/technologies/d-dalus-letatelnyj-apparat-novogo-pokolenija/> (дата обращения: 03.08.2022).
6. Группа «Арей». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arey-group.ru> (дата обращения: 01.08.2022).

### References

1. Wikipedia. Free encyclopedia. The population of the Earth [Electronic resource]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Population\\_land](https://ru.wikipedia.org/wiki/Population_land) (accessed: 27.07.2022).
2. Cyclocopter [Electronic resource] // Wikipedia. Free encyclopedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклокоптер#:~:text="Airplane"%20sverchkova.%20The%20first%20apparat%20С%20иногда,цикложир%20или%20циклокоптер%20достаточно%20условно](https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклокоптер#:~:text=) (date of reference: 01.08.2022).
3. Rotoplan [Electronic resource]. URL: <https://www.rotoplan.narod.ru/history.htm> (date of reference: 13.07.2022).
4. The development program of cyclones "Cyclone". A new implementation of an old idea. Military review. [electronic resource]. URL: <https://topwar.ru/184287-programma-razrabotki-cikloletov-ciklon-novaja-realizacija-staroj-idei.html?> (date of address: 01.08.2022).
5. Denis Voronin . D-Dalus is a new generation aircraft. [electronic resource]. URL: <https://craftster.ru/technologies/d-dalus-letatelnyj-apparat-novogo-pokolenija/> (accessed: 08.03.2022).
6. Ares Group. [electronic resource]. URL: <https://www.arey-group.ru> (accessed: 01.08.2022).

© Прохоров В. В., 2022

УДК 629.78-047.37

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Е. А. Рожкова, В. А. Бордачев, М. Н. Драганюк

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

*Данная статья посвящена изучению катастроф в ракетно-космической отрасли, рассказывается об их масштабах, а также о положительных и отрицательных последствиях трагедий.*

*Ключевые слова: катастрофа, космодром, ракета-носитель, экипаж, ошибки, жизнь.*

## STUDY OF EMERGENCY SITUATIONS IN THE HISTORY OF THE DOMESTIC ROCKET AND SPACE INDUSTRY

E. A. Rozhkova, V. A. Bordachev, M.N. Draganyuk

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

*This article is devoted to the study of disasters in the rocket and space industry, tells about their scale, as well as the positive and negative consequences of tragedies.*

*Keywords: catastrophe, rocket, crew, mistakes, life.*

В настоящее время в российской ракетно-космической отрасли происходит масштабная реструктуризация, направленная на решение многих накопившихся в ней проблем и противоречий. Нельзя ожидать быстрого эффекта от резкого увеличения финансовых вложений в отрасль. Серия крупных аварий, которые регулярно происходили в отрасли в последние годы и значительно подпортили её имидж в глазах высшего руководства страны, а также зарубежных партнеров и заказчиков, привела к серьезным изменениям в национальной космической программе.

В 1960 году, незадолго до легендарного полета Гагарина на космодроме Байконур произошла ужасная трагедия, но все данные были надежно засекречены. Несмотря на огромное количество жертв, о трагедии стало известно лишь в 1989 году, незадолго до распада СССР. В связи с обострением международных отношений, Хрущев приказал ускорить разработку межконтинентальных баллистических ракет. На 24 октября 1960 года было назначено испытание на космодроме Плесецк ракеты Р-16. Ракета, по заверениям многих, требовала значительных доработок, шли споры о том, стоит ли откладывать испытания, однако маршал Неделин испугался поруганий от главы правительства, в случае задержки сроков, поэтому было сказано доработать ракету на старте. [1]

Когда была объявлена 30-минутная готовность, произошел внештатный запуск двигателя второй ступени, пламя которого смогло прорвать и без того неготовые к запуску пиромембраны топливных баков. Вследствие чего начался лавинообразный пожар, волны огня расходились во все стороны. Аварийно-спасательные работы удалось начать лишь через два часа, когда пламя поутихло. Погибших насчитывается около 78 - 120 человек, но точное количество неизвестно. По официальным данным считается, что причиной стало преждевременное включение одного из двигателей ракеты и нарушение мер безопасности.

Следующее крушение в истории СССР произошло 23 апреля 1967. Предполагалось первое в истории испытание пилотируемого корабля серии «Союз». В последние годы США каждые несколько месяцев ставили новые космические рекорды, что настораживало русских. Именно это повлияло на то, чтобы свернуть «лунную программу» и провести испытания недоработанного аппарата. «Союз-1»

с пилотом Владимиром Комаровым вышел на орбиту. Предполагалась стыковка в космосе с другим кораблем – «Союзом-2», который должен был быть запущен со своим экипажем из трех человек позже. Однако у «Союза-1» не раскрылась одна из солнечных батарей, и экипаж второго корабля не полетел. Комарову было приказано вернуться на Землю, что он и сделал практически вручную из-за недостаточной проработки ориентационных возможностей корабля.

Благодаря профессионализму пилота, вхождение в атмосферу прошло нормально, однако на последней стадии приземления основной тормозной парашют не раскрылся. Запасной же раскрылся, но запутался, и корабль вскоре врезался в поверхность планеты. Комаров погиб. В заключении написали, что причиной стала недоработка технологий или ошибка на производстве, из-за чего не раскрылся основной тормозной парашют, в следствии чего, космический корабль не смог затормозить падение после входа в атмосферу и разбился в результате от удара об землю.

Спустя ещё 4 года в 1971 году случилась ещё одна трагедия с экипажем «Союза- 11». Их миссия заключалась в стыковке с орбитальной станцией «Салют-1» и различных работах на ее борту. Несмотря на некоторые трудности, экипаж смог проработать на станции 11 дней. Потом было зафиксировано серьезное возгорание, тогда космонавтам приказали вернуться на Землю. Вхождение в атмосферу, торможение, приземление – все происходило в штатном режиме, однако на вопросы центра управления полёта космонавты не отвечали. Когда люк аппарата открыли, все члены экипажа были мертвы.

Вскоре выяснилось, что они пострадали от декомпрессионной болезни, то есть произошла разгерметизация корабля на большой высоте, отчего давление резко понизилось до недопустимого уровня. Скафандров в космическом корабле не было – такова была его конструкция. Из-за невыносимой боли космонавты не смогли вовремя устранить неполадку. После этой трагедии пилотов «Союза» стали в обязательном порядке снабжать скафандрами, из-за чего пришлось запускать экипажи по два человека вместо трех, потому что скафандры занимали много места, а кабины «Союзов» были очень тесны. Со временем конструкцию усовершенствовали, и на «Союзах» вновь стали летать тройками. Официальной причиной является преждевременное открытие вентиляционного клапана, разгерметизации аппарата. Последнее связано скорее из-за недоработок технологий клапанов.

Последняя катастрофа унесла 48 жизней. Она произошла 18 марта в 1980 году на космодроме Плесецк, где готовилась к запуску ракета «Восток» со спутником-шпионом «Икар» на борту. Когда шла заправка топливом, а именно керосином, жидким кислородом, азотом, а в последнюю очередь осуществлялась заправка перекисью водорода, тогда и произошло возгорание. В результате чего, около 300 тонн топлива детонировали, а дальше начался сильный пожар, который сразу унес 44 жизни, еще четыре человека скончались от многочисленных ожогов. Комиссия обвинила во всем халатность боевого расчета, осуществлявшего запуск. Только спустя 16 лет было проведено независимое расследование, в результате которого причиной было названо применение опасных материалов в конструкции топливных фильтров для перекиси водорода.[5]

Изучив известные катастрофы в истории СССР, можно сделать вывод, что люди заплатили жизнью за лидерство в космической гонке с великими державами. Если бы инженерам и учёным дали ещё немного времени, либо не ставили просто жёстких сроков, то какие-то крушения можно было избежать. Не стоит убирать из внимания и тот факт, что даже без спешки человек может допустить ошибку, как происходит на этапе разработки и производстве. Для этого есть несколько этапов проверки, изготовление моделей ракет и репетиции на симуляторах, которые стали возможны благодаря техническому прогрессу.

Так или иначе внештатные ситуации помогли сделать усовершенствование технологий систем спасения, обеспечивающий спасение экипажа на любом участке полёта, то есть от аварии на ракетеносителе на стартовом столе до практически самого выхода на орбиту.

Фундаментом проблем с низким качеством и плохим контролем кроются в другом – кадровой проблеме: на российских космических предприятиях ощущается острая нехватка квалифицированных инженеров и рабочих. Эта проблема особенно остро стоит в сотрудничестве. Подготовка кадров, существовавшая в СССР, сильно ухудшилась.

Существует также необходимость разработки новой Федеральной космической программы России. Она должна соответствовать возросшему уровню финансирования и стать более прагматичной, чем существующая. Однако главной гарантией успеха космической политики России в ближайшем будущем должно стать изменение в управлении самой отраслью, отход от советских принципов, которые успешно работали в плановой, жестко регулируемой экономике, но не эффективны на свободном рынке.

Кто внесет эти изменения сейчас, пока не совсем ясно, поскольку процесс реструктуризации отрасли только начинается. Очевидно, что глава Роскосмоса должен организовать процесс выработки новой государственной политики в области космонавтики. На долю другого руководителя приходится изменение ситуации с качеством производства существующего оборудования и организацией работы на перспективных направлениях. Только решительные шаги работников и руководителей, направленные на изменение ситуации в отрасли, и их положительные результаты будут восприняты руководством государства как подтверждение правильности выбранного курса реформирования ракетно-космической отрасли России.

#### **Библиографические ссылки**

1. Naked Science – новости науки [Электронный ресурс]. URL: <https://naked-science.ru/article/top/10-largest-cosmic-catastrophes> (дата обращения: 11.09.2022).
2. Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Сеченов Ю.Н., Шалай В.В. Ракеты-носители. Проекты и реальность: Кн. 1: Ракеты-носители России и Украины. С.380
3. Кулинич Д.Д. Слово о ракетном топливе. Москва: Воениздат, 1969. 108 с.
4. Вокруг света – первый познавательный портал [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6741/> (дата обращения: 11.09.2022).
5. Русское космическое общество [Электронный ресурс]. URL: <https://cosmatica.org/articles/647-istorija-razvitija-otechestvennoi-kosmicheskoi-programmy.html> (дата обращения: 19.09.2022).
6. Исследования по истории и теории развития авиационной и ракетно-космической науки и техники / Б.В. Раушенбаха, Ю.Н. Коптева, В.В. Алавердова, Б.В. Бодина. Вып. 8-10. М.: Наука, 2001. 245 с.

#### **References**

1. Naked Science – science news [Electronic resource]. URL: <https://naked-science.ru/article/top/10-largest-cosmic-catastrophes> (accessed 09/11/2022).
2. Blinov V.N., Ivanov N.N., Sechenov Yu.N., Shalay V.V. Launch vehicles. Projects and reality: Book. 1: Launch vehicles of Russia and Ukraine. p.380
3. Kulinich D.D. A word about rocket fuel. - Moscow: Military Publishing House, 1969. 108 p.
4. Around the world – the first cognitive portal [Electronic resource]. URL: <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6741/> (date of access: 09/11/2022).
5. Russian Space Society [Electronic resource]. URL: <https://cosmatica.org/articles/647-istorija-razvitija-otechestvennoi-kosmicheskoi-programmy.html> (date of access: 09/19/2022).
6. Research on the history and theory of development of aviation and space rocket science and technology / B.V. Raushenbakh, Yu.N. Kopteva, V.V. Alavardova, B.V. Bodin. Issue. 8-10. M.: Nauka, 2001. 245 p.

© Рожкова Е. А., 2022

УДК 620.1:669.295

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ С УГЛЕПЛАСТИКОМ

М. С. Руденко, А. В. Гирн, 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: rudenko\_ms@sibsau.ru

*Представлены результаты исследования влияния лазерной обработки поверхности титанового сплава на прочность клеевого соединения пары «титан-углепластик».*

*Ключевые слова: лазерная обработка, прочность клеевого соединения, титановый сплав, углепластик.*

## INFLUENCE OF LASER PROCESSING OF TITANIUM ALLOYS ON THE STRENGTH OF ADHESIVE JOINT WITH CFRP

M. S. Rudenko, A. V. Girn, A. E. Mikheev

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

*The results of a study of the effect of laser treatment of the surface of a titanium alloy on the strength of the adhesive joint of a titanium-carbon fiber pair are presented.*

*Keywords: laser processing, adhesive strength, titanium alloy, carbon fiber.*

### Введение

Титановые сплавы широко используют в качестве элементов крепления, шарниров, силовых элементов в космическом аппарате (КА). В частности, титановые сплавы используются для создания неразъёмных клеевых соединений углепластиковых конструкций. Поскольку традиционные методы соединения (сварка, пайка), применяемые для металлических деталей, не могут быть использованы для деталей из композиционных материалов (КМ) или усложняют конструкцию (резьбовые, клепанные соединения и др.) [1], КМ приклеивают к металлическим элементам, через которые обеспечивается соединение. На рис. 1 представлен фитинг замка зачековки КА, который представляет собой клеевую пару «Титан-Углепластик».

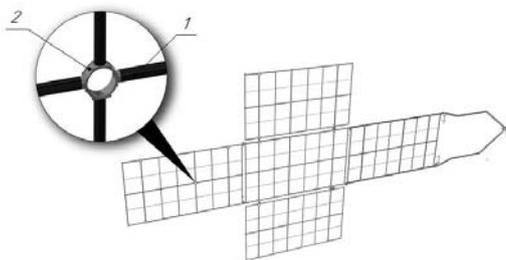


Рис. 1. Механическое устройство батареи солнечной:  
1 – силовой трубчатый элемент (углепластик); 2 – фитинг (титановый сплав)

Несмотря на видимые преимущества клеевого соединения, прочность таких узлов довольно низкая. Это связано с тем, что титановые сплавы относятся трудносклеиваемым материалам, так как на поверхности сплава всегда находится тонкая оксидная пленка, которая препятствует образованию

межатомных и межмолекулярной связи между клеем и подложкой. Увеличить адгезионную прочность титановых сплавов можно с помощью предварительной обработки перед склеиванием. Методы обработки титана для увеличения адгезионной прочности при склеивании рассмотрены в работе [2]. Лазерная обработка является перспективным методом увеличения адгезионной прочности титанового сплава [3]. Данный метод обладает высокой производительностью и стабильностью свойств обработанной поверхности, а также, в отличие от химических методов обработки поверхности экологической чистотой процесса.

Ранее были проведены исследования [4,5], где определялись влияния метода обработки поверхности титанового сплава на прочность клеевого соединения пары «титан-титан». Было выявлено, что лазерная абляция поверхности положительно влияет на адгезионную прочность поверхности титанового сплава.

### Эксперимент

В данном исследовании использовались образцы титанового сплава ОТ-4, размерами 70×20×2 мм и образцы двунаправленного углепластика КМУ-4 размерами 70×20×1 мм. Образцы склеивались трехкомпонентным клеем ВК-9 (ОСТ 1-90281-86) внахлест. Склеивание проводилось согласно ОСТ 92-0949-74. Площадь клеевого соединения  $S=300 \text{ мм}^2$ . Для обеспечения статистической надежности испытывалась партия из 5 образцов.

Для определения прочности клеевого соединения пары «титан-углепластик» проводились испытания на сдвиг (англ. Single-Lap Shear Test). Механическое испытание проводилось через 24 часа после склеивания на универсальной разрывной машине (Eurotest T-50, S.A.E.IBERTEST, Испания) со скоростью 5 мм/мин.

Лазерная обработка поверхности проводилась на иттербиевом импульсном волоконном лазере (IPG, YLPM-1- 4×200-20-20). В предыдущем исследовании [5] были выявлены характерные текстуры поверхности, которые были взяты за основу в этой работе. Режимы лазерной обработки представлены в табл. 1. Длина волны лазера 1,064 мкм, частота следования импульсов 40 кГц, энергия в импульсе 0,5 мДж. Схема перемещения лазерного луча является двунаправленная штриховка по одной оси.

Для сравнения, были изготовлены и испытаны на сдвиг образцы с механическими методами обработки поверхности титанового сплава: ручное шлифование поверхности в двух направлениях и с пескоструйной обработкой. Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром (TR110, TIME Group Inc., Китай). Результаты шероховатости поверхности представлены в табл. 2. Среднее значение шероховатости углепластика составляет 0,85 мкм.

Таблица 1

Параметры лазерной обработки поверхности титанового сплава

№ режима	1	3	12	13
Мощность лазера, Вт	10	20	20	10
Скорость обработки, мм/с	200	200	200	400
Количества полос на 1 мм	15	15	25	25
Микроструктура поверхности				

Таблица 2

Значение шероховатости поверхности титанового сплава с разными методами обработки перед склеиванием

Метод обработки	Ti без обработки	Ручное шлифование	Пескоструйная обработка	Лазерная обработка режим №1	Лазерная обработка режим №3	Лазерная обработка режим №12	Лазерная обработка режим №13
Ra, мкм	0,78	1,23	1,15	6,5	9,65	5,37	1,76

На рис. 2 представлены результаты средних значений прочности на сдвиг клеевых соединений.

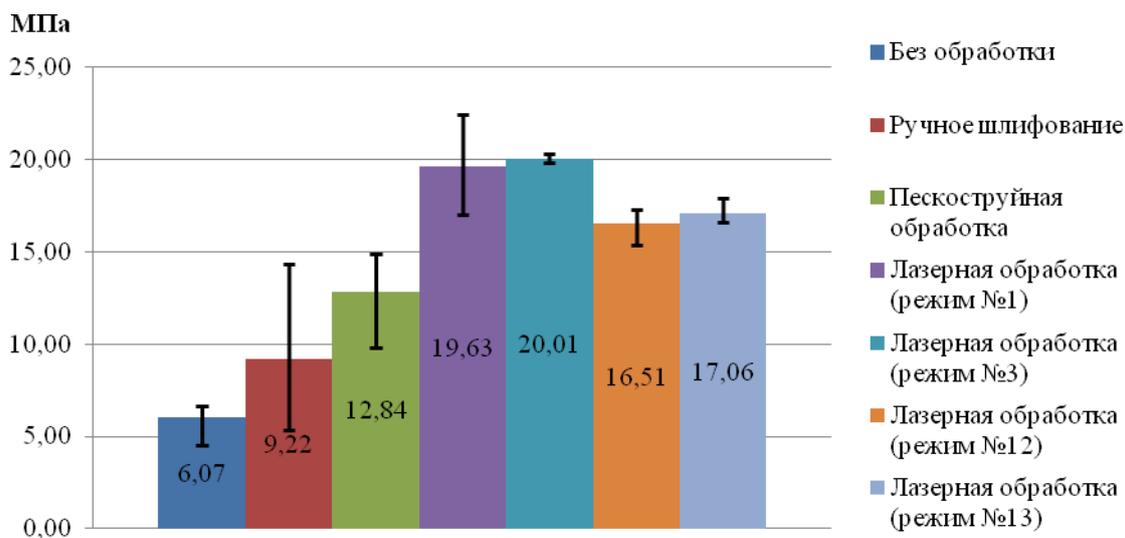


Рис. 2. Результаты испытаний прочности образцов на сдвиг

### Результаты и обсуждения

По рис. 2 видно, что лазерная обработка поверхности титанового сплава благоприятно влияет на прочность клеевого соединения пары «титан-углепластик». Если сравнивать результаты, то лазерная обработка увеличила прочность более чем на 160 % по сравнению с не обработанной поверхностью. Так как на производстве перед склеиванием металла и композиционного материала, металл механически обрабатывается для увеличения площади сцепления, будет правильной сравнивать прочность образцов с лазерной обработкой со значением образцов с ручным шлифованием. Следовательно, прочность образцов с лазерной обработкой увеличилось более чем на 80% относительно среднего значения механического шлифования.

Наибольшее значение прочности на сдвиг показали образцы с лазерной обработкой № 1 и № 3. Это связано с наибольшим увеличением площади склеивания поверхности, а так же механического запирания клея в микрорельефе структуры. Режим №13 имея незначительное увеличение площади поверхности, что видно из шероховатости поверхности, показал значительный прирост прочности клеевого соединения. Это значит, что улучшение прочности на сдвиг, вызванное лазерной обработкой поверхности, представляет собой смешанный эффект увеличения площади поверхности, механического запирания клея и изменения химического состава поверхности. Химический состав структуры поверхности под воздействием лазерного сканирования постепенно трансформируется из Ti и Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в кристаллический TiO<sub>2</sub>. Лазерная обработка способствует превращению металлических элементов и оксидов с низкой валентностью в оксид с высокой валентностью [6, 7], что способствует связи клея и поверхности.

Характер разрушения клеевого соединения у образцов с лазерной обработкой преимущественно когезионное, но также наблюдались образцы с разрушением материала углепластика, то есть сдвиговые напряжения в композиционном материале превосходили адгезионную прочность. Характер разрушения у образцов без обработки, с ручной шлифовкой и пескоструйной обработкой показал адгезионное и смешанное разрушение. Стоит отметить, что испытания образцов с ручной шлифовкой показал сильный разброс значений, что указывает на малую надежность данного метода склеивания.

Если сравнивать результаты предыдущего исследования [5] с представленными, то можно наблюдать уменьшение прочности клеевого соединения у одинаковых режимов лазерной обработки на 25%, что связано с влиянием подготовки углепластика перед склеиванием.

### Заключение

Исследование показало, что лазерная обработка поверхности титанового сплава перед склеиванием с углепластиком увеличивает клеевую прочность более чем на 80%, по сравнению с современной технологией склеивания (механическая обработка). Наибольший показатель прочности показали

образцы с режимами обработки, которые обеспечивают наибольшую площадь склеивания (режим № 1 и № 3).

### Библиографические ссылки

1. G. Yang, T. Yang, W. Yuan, Y. Du, The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints, *Compos. Pt. B-Eng.* 160 (2019) стр. 446–456
2. Сибилева С. В., Каримова С. А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // *Авиационные материалы и технологии.* 2013. № S2. С. 25–35.
3. Baburaj E.G., Starikov D., Evans J., Shafeev G.A., Bensaoula A. Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007. V. 27. P. 268–276.
4. Руденко М. С., Марченко С. В., Раводина Д. В., Гирн А. В., Михеев А. Е. Способы повышения адгезии клеевого соединения титанового сплава // *Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск.* 2021. Ч. 1. С. 52–54.
5. 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
6. Yifei Wang , Meiju Zhang , Kangmei Li et al. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy / *Optics and Laser Technology* 139 (2021) 106987
7. Yifei Wang, Jing Zhang, Kangmei Li, Jun Hu Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser *Journal of Materials Science & Technology* 94 (2021), с. 136–146

### References

1. G. Yang, T. Yang, W. Yuan, Y. Du, The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints, *Compos. Pt. B-Eng.* 160 (2019) str. 446–456
2. Sibileva S. V., Karimova S. A. Obrabotka poverhnosti titanovyh splavov dlja obespechenija adgezionnyh svojstv (obzor) // *Aviacionnye materialy i tehnologii.* 2013. № S2. S. 25–35.
3. Baburaj E.G., Starikov D., Evans J., Shafeev G.A., Bensaoula A. Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007. V. 27. P. 268–276.
4. Rudenko M. S., Marchenko S. V., Ravodina D. V., Girn A. V., Miheev A. E. Sposoby povysheniya adgezii kleevogo soedinenija titanovogo splava // *Reshetnevskie chteniya : materialy XXV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnojarsk.* 2021. Ch. 1. S. 52–54.
5. Girn A. V., Rudenko M. S., Tajgin V. B., Miheev A. E., Ravodina D. V. Vlijanie lazernoj obrabotki poverhnosti titanovyh obrazcov na adgezionuju prochnost' kleevyh soedinenij // *Kosmicheskie apparaty i tehnologii.* 2022. T. 6. № 2. S. 90-99. doi: 10.26732/j.st.2022.2.03
6. Yifei Wang , Meiju Zhang , Kangmei Li et al. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy / *Optics and Laser Technology* 139 (2021) 106987
7. Yifei Wang, Jing Zhang, Kangmei Li, Jun Hu Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser *Journal of Materials Science & Technology* 94 (2021), str. 136–146

© Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е., 2022

УДК 620.197

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЯ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ НА МАССОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ

Д. О. Савельев\*, А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина

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

*Рассмотрено влияние формы изделия на массовые характеристики покрытия при микродуговом оксидировании. Полученные результаты позволят определить зависимость роста покрытия от геометрических параметров оксидируемого изделия.*

*Ключевые слова: фольга АД1, прирост массы, микродуговое оксидирование (МДО), площадь покрытия, электролит,*

## THE EFFECT OF THE PRODUCT SHAPE DURING MICROARC OXIDATION ON THE MASS CHARACTERISTICS OF THE COATING

D. O. Savelyev\*, A. E. Mikheev, A.V. Girm, D. V. Ravodina

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

*The influence of the product shape on the mass characteristics of the coating during microarc oxidation is considered. The obtained results will allow us to determine the dependence of the coating growth on the geometric parameters of the oxidized product.*

*Keywords: AD1 foil, weight gain, microarc oxidation (MAO), coating area, electrolyte.*

Тенденция аэрокосмической отрасли к повышению удельных характеристик элементов конструкции летательного аппарата (ЛА) побуждает ученых не только к поиску новых материалов, но и к совершенствованию технологии обработки и упрочнения существующих материалов.

Одним из простых способов повышения удельных характеристик материала ЛА является поверхностное упрочнение. Микродуговое оксидирование является электрохимическим способом упрочнения поверхностного слоя на вентильных металлах и их сплавах.

В процессе МДО алюминия на его поверхности образуется покрытие, включающее оксид алюминия и комплексы, входящие в электролит. Физико-химические характеристики покрытия зависят не только от сплава металла, электролита, но и от режима технологической обработки. От данных параметров зависит также кинематика роста покрытия [1,2].

Поскольку данная технология модифицирует поверхностный слой металла и образует на его поверхности покрытие толщиной от 3 до 200 мкм, пренебрежение массой и толщиной покрытия может привести к технологическим просчетам в конструкции ЛА. Поэтому актуальной проблемой является изучение влияния составляющих процесса МДО на массовые характеристики изделий после обработки.

Образцы холоднокатаной фольги из технической чистой марки алюминия АД1 площадью 0,4 дм<sup>2</sup>, 0,8 дм<sup>2</sup> и 1,6 дм<sup>2</sup> поштучно оксидировали в водном растворе 4 г/л NaOH и 10 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.

Для выявления влияния формы образца на массовые характеристики МДО-покрытия были обработаны образцы прямоугольной формы и образцы, имеющие форму куба, равные по площади обрабатываемой поверхности при постоянных параметрах оксидирования. Плотность тока  $j = 30, 15, 7, 5$  А/дм<sup>2</sup> для образцов площадью 0,4, 0,8, и 1,6 соответственно; соотношение анодной

и катодной составляющих тока  $I_k:I_a = 0,5$ ; время оксидирования – 240 секунд, температура электролита – 20–30 °С.

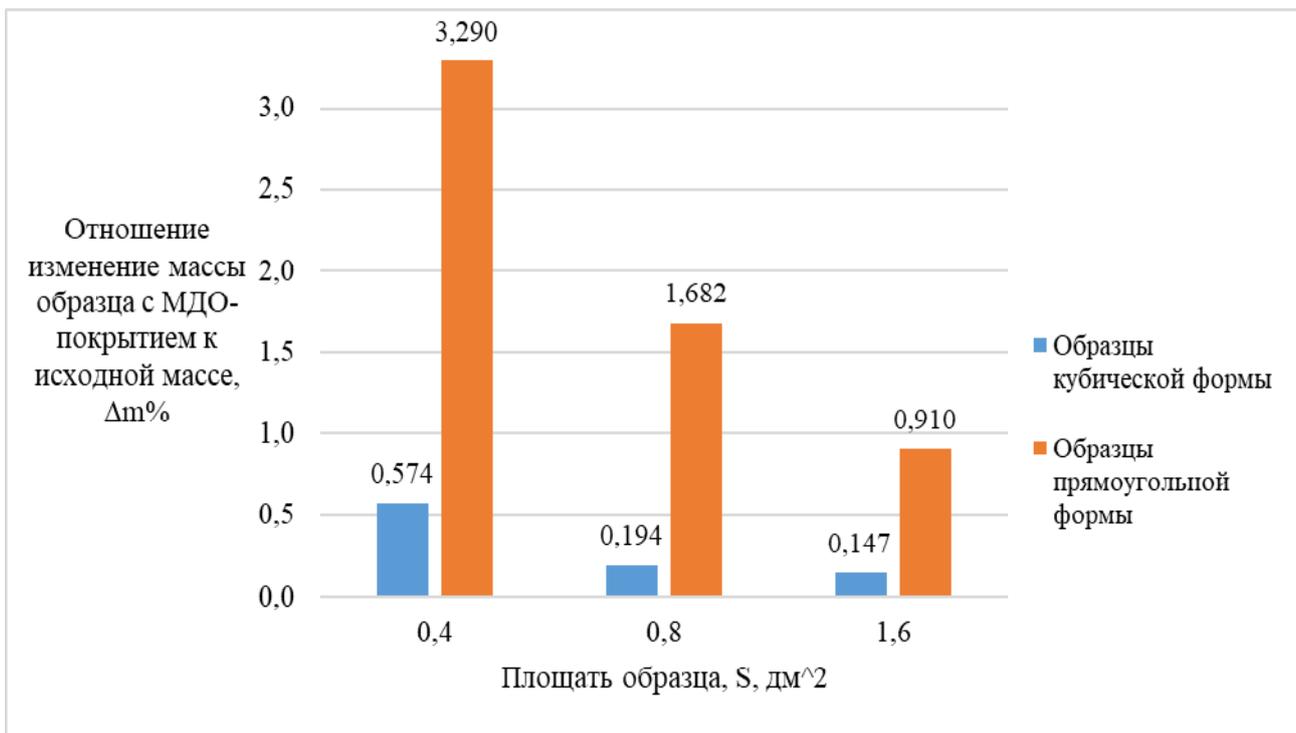
После обработки измеряли массу образца на аналитических весах специального класса точности (I) ViBRA HT-124RCE с дискретностью индикации веса 0,0001 г.

Отношение изменения массы образца к исходной массе выраженное в процентах рассчитывается по формуле [1]:

$$\Delta m_{\%} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%,$$

где  $m_2$  – масса образца с МДО-покрытия, г;  $m_1$  – масса образца без МДО-покрытия, г.

Графическое представление данных приводится на рисунке.



Зависимость отношения изменения массы образца с МДО-покрытием к исходной массе в процентах от площади покрытия

Следует отметить, что при закреплении образцов соблюдалось условие параллельности сторон изделия стенкам электролитической ванны, а также равное расстояние между сторонами и стенками для исключения влияния расположения противоэлектродов на результат исследования [3].

Исходя из данных диаграммы можно сделать вывод, что кинетика формирования МДО-покрытия значительно зависит от формы оксидируемого изделия. Чем более развитая форма изделия, тем менее интенсивное формирование покрытия.

Следуя тенденции диаграммы, можно предположить, что чем больше площадь покрытия, тем менее значительна форма изделия. Поскольку в данных пределах исследования разница изменения массы образцов различной формой с увеличением площади уменьшается, а прирост массы на квадратный метр изменяется в малых пределах.

Для формирования качественного МДО-покрытия потребуется противоэлектрод, который полностью или частично повторяет формы оксидируемого изделия.

Рост покрытия является нелинейной функцией, а природа формирования объясняется законами фарадеевской теории, поэтому для выявления зависимости необходимо тщательное изучение влияние не только режимов обработки, но и изучить влияние полупериодов тока и паузы между ними на процесс МДО.

### Библиографические ссылки

1. Влияние времени процесса микродугового оксидирования на массовые характеристики МДО-покрытия / Савельев Д. О., Михеев А. Е., Раводина Д. В. и др. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. дню космонавтики (12–16 апреля 2021 г., Красноярск) : в 3 т. Т. 1. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. С. 110-112.
2. Процесс формирования структуры и состава МДО-покрытий на алюминиевых сплавах / А. Е. Михеев, Гирн А. В., Вахтеев Е. В. и др. // Вестник СибГАУ. 2013. №2(48). С. 206-211.
3. Савельев Д. О. Анализ влияния взаимного расположения электродов на кинетику формирования МДО-покрытия // Гагаринские чтения 2022: сб. тезисов работ межд. молод. науч. конф. М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 560-562.

### References

1. Savel'ev D. O., Miheev A. E., Ravodina D. V., Haritonov E. A., Titarenko D. A. [The effect of the microarc oxidation process time on the mass characteristics of the MAO coating]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavтики: sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii posvjashjonej dnju kosmonavтики*. [collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, dedicated. Cosmonautics Day "Actual problems of aviation and cosmonautics"]. Krasnojarsk, 2021, P. 110-112 (In Russ.).
2. Miheev A. E., Girn A. V., Vahteev E. V., Alekseev E. G., Bashkov I. V. [The process of forming the structure and composition of MDO coatings on aluminum alloys]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2(48), P. 206-211(In Russ.).
3. Savel'ev D. O. [Analysis of the influence of the mutual arrangement of the electrodes on the kinetics of the formation of the MAO coating]. *Gagarinskie chtenija 2022: sbornik tezisov rabot mezhdunarodnoj molodjozhnoj nauchnoj konferencii*. [collection of abstracts of the international youth scientific conference "Gagarin Readings 2022"]. Moscow, 2022, P. 560-562.

© Савельев Д. О., Михеев А. Е., Гирн А. В., Раводина Д. В., 2022

УДК 62-272.2

## КАСАТЕЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ ПРУЖИНЫ РАСТЯЖЕНИЯ – СЖАТИЯ

П. Н. 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: psmirnov@list.ru

*Рассматривается проблема определения касательной жесткости винтовой пружины растяжения – сжатия, которая необходима для моделирования упругого контакта между деталями конструкций ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: винтовые пружины, касательная жесткость, конечно-элементное моделирование.*

## TANGENT STIFFNESS OF THE COIL TENSION – COMPRESSION SPRING

P. N. Smirnov

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

*Reviewing the problem of calculation tangent stiffness for coil tension – compression spring. This stiffness is using for implementation of elastic support in aerospace structures.*

*Keywords: coil spring, tangent stiffness, FEM.*

Упругие элементы используются в трансформируемых конструкция ракетно-космической техники для как для реализации требуемого движения, так и для регулировки относительного положения отдельных элементов. Кроме того, упругие элементы позволяют сохранять необходимое положение всех элементов конструкции при различных внешних воздействиях: нагреве и охлаждении отдельных элементов, неполной отработки требуемых перемещений и т.д. Самыми распространенными упругими элементами в машиностроении являются винтовые пружины, которые работают, в основном, на растяжение или сжатие. Однако, такие элементы способны компенсировать отклонения не только в направлении оси пружины, но и перпендикулярно ему.

Для анализа работоспособности и сравнения различных исполнений разрабатываемых конструкций широко используется конечно-элементное моделирование. Современное программное обеспечение позволяет анализировать сложные модели, состоящие из большого количества элементов. Однако, сложность модели напрямую влияет на время расчета, вследствие чего конструкторские твердотельные модели подлежат максимально возможному упрощению перед проведением конечно-элементного анализа. Упругие элементы можно реализовать при помощи упругого контакта деталей, позволяющего задаваться нормальной и касательной жесткостями. Например, в ANSYS контактные конечные элементы CONTA имеют для таких целей параметры FKN и FKT [1]. Формула определения нормальной жесткости винтовых пружин известна [2, 3]. Существуют также и различные подходы к определению касательной жесткости винтовых пружин [4, 5]. Целью данной работы является получение новой зависимости для вычисления касательной жесткости винтовой пружины растяжения – сжатия.

Рассмотрим один виток пружины, один конец которого жестко закреплен, а к другому концу приложена сила  $P$ , перпендикулярная продольной оси витка (рис. 1). Эквивалентная система сил в произвольном сечении витка будет состоять из нормальной силы  $N_p$ , перерезающей силы  $Q_p$  и изгибающего момента  $M_p$ . Моментом кручения поперечного сечения витка пренебрегаем вследствие малости угла подъема.

Для определения перемещения в направлении  $s$  сечений витка запишем интеграл Мора для стержня большой кривизны [6], пренебрегая вкладом перерезывающей силы.

$$\delta = \int_{\Gamma} \left( \frac{M_p M_1}{EAeR} + \frac{N_p N_1}{EA} + \frac{M_p N_1 + N_p M_1}{EAR} \right) ds, \quad (1)$$

где  $N_p, N_1, M_p, M_1$  – внутренние силовые факторы в сечении витка,  $E$  – модуль Юнга,  $A$  – площадь поперечного сечения витка,  $R$  – радиус намотки пружины,  $e$  – расстояние от оси поперечного сечения до нейтральной линии.

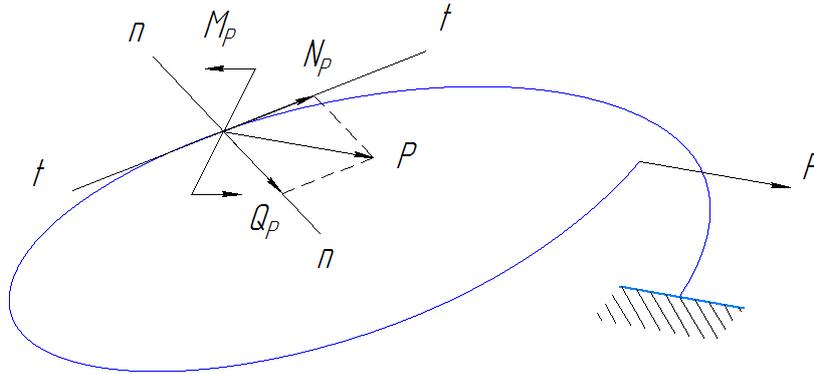


Рис. 1. Расчетная схема витка пружины

В результате решения интеграла (1) и проведение арифметических преобразований, получаем выражение для касательной жесткости винтовой пружины растяжения – сжатия.

$$c = \frac{EAeh}{4\pi n^2 R(R-e)\cos\alpha}, \quad (2)$$

где  $h$  – высота пружины,  $\alpha$  – угол подъема витков.

Для верификации полученного выражения разработана конечно-элементная модель винтовой пружины в программном обеспечении ANSYS R2021. Модель витков состоит из балочных элементов, монтажные хвостики пружины смоделированы как абсолютно жесткие балки (рис. 2). Крайний узел на нижнем конце имеет ограничения на перемещения по всем степеням свободы, на крайний узел на верхнем конце налагаются кинематические граничные условия – перемещения по направлению, перпендикулярному оси пружины.

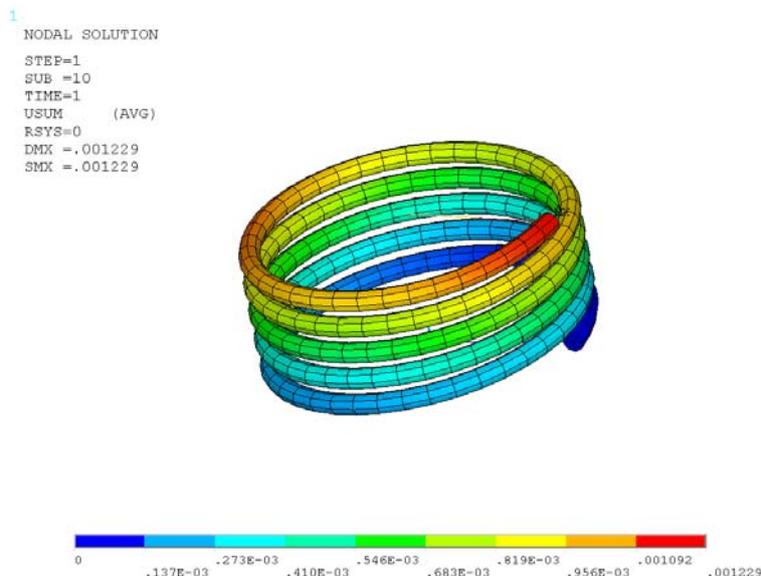


Рис. 2. Конечно-элементная модель пружины

Результаты численного моделирования приведены в таблице.

**Численное моделирование винтовой пружины**

Параметры пружины	Формула (2), Н/мм	FEM, Н/мм	□, %
d = 2 мм, D = 25 мм, h = 14 мм, n = 6	2,499	2,332	□□
d = 1,5 мм, D = 20 мм, h = 10 мм, n = 4	2,484	2,355	□□
d = 1,8 мм, D = 21 мм, h = 12 мм, n = 5	3,419	3,151	□□
d = 1,6 мм, D = 24 мм, h = 11 мм, n = 5	1,308	1,372	□□

Разница между результатами численного моделирования и вычисления жесткости по соотношению (2) не превышает 10 %. Что позволяет сделать вывод об удовлетворительной точности предложенного способа определения касательной жесткости винтовой пружины растяжения – сжатия.

### Библиографические ссылки

1. Ansys User Manual: Element Library [Электронный ресурс]. URL: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_CONTA175.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/ans_elem/Hlp_E_CONTA175.html) (дата обращения 06.09.2022).
2. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. Изд. 3-е. М.: Высшая школа, 1969. 734 с.
3. ГОСТ 13765-86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров. М., 1999, 15 с.
4. Коноваленко В. В., Пополов Д.В., Зайцев Г. Л., Засельский И. В. К расчету горизонтальной жесткости винтовых цилиндрических пружин // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 2017. №35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-raschetu-gorizontальноy-zhestkosti-vintovyh-tsilindricheskih-pruzhin> (дата обращения: 07.09.2022).
5. Сорокин Ф.Д., Су Чжоу Конечный элемент в виде витка для расчета частот и форм собственных колебаний пружин с учетом сдвига и инерции вращения // Известия вузов. Машиностроение. 2018. №1 (694). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konechnyy-element-v-vidе-vitka-dlya-rascheta-chastot-i-form-sobstvennyh-kolebaniy-pruzhin-c-uchetom-sdviga-i-inertsii-vrascheniya> (дата обращения: 07.09.2022).
6. Сборник задач по сопротивлению материалов с теорией и примерами / Под ред. А. Г. Горшкова, Д. В. Тарлаковского. Учебн. пособие: Для вузов. 2-е изд., перераб. и допол. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 632 с.

### References

1. Ansys User Manual: Element Library [Electronic Textbook]. URL: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_CONTA175.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/ans_elem/Hlp_E_CONTA175.html) (accessed 06.09.2022).
2. Darkov A. V., Shpiro G. S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, High School Publ., 1969. 734 p.
3. GOST 13765-86. *Pruzhini vintovye cilindricheskie szhatija i rastjazhenija iz stali kruglogo sechenija. Oboznachenie parametrov, metodika opredelenija razmerov.* [Cylindrical helical compression and extension springs made of round section steel. Designation of parameters, sizing method]. Moscow, Publ. of Standarts 1999, 15 p.
4. Konovalenko V. V., Popolov D. V., Zajcev G. L., Zasel'skij I. V. *K raschetu gorizontальноy zhestkosti vintovyh cilindricheskih pruzhin* [To the calculation of the horizontal stiffness of helical coil springs]. GVUZ «Pryazovskiy State Technical University». 2017, no. 35, p. 110-116 (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-raschetu-gorizontальноy-zhestkosti-vintovyh-tsilindricheskih-pruzhin> (accessed 07.09.2022).
5. Sorokin F. D., Su Zhou [A Finite Element in the Form of a Single Coil for Calculating Natural Frequencies and Mode Shapes of Springs with Consideration of the Rotational Inertia and Shear]. *Izvestija vuzov. Mashinostroenie*. 2018, no. 1 (694), p. 3-10 (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konechnyy-element-v-vidе-vitka-dlya-rascheta-chastot-i-form-sobstvennyh-kolebaniy-pruzhin-c-uchetom-sdviga-i-inertsii-vrascheniya> (accessed 07.09.2022).
6. Gorshkov A. G., Tarlakovskij D. V. *Sbornik zadach po soprotivleniju materialov s teoriej i primerami* [Collection of problems on the strength of materials with theory and examples]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003. 632 p.

УДК 629.78

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ РАКЕТОСТРОЕНИИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

А. О. Соколова, В. В. Майоров\*, П. В. Фадеенков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

\*E-mail: viktor.majorov.01@mail.ru

*Приведены результаты испытаний композиционного материала. Проведена оптимизация массы экспериментальной ракеты СКБ «RocketLAV». Сделан вывод о применимости композиционных материалов.*

*Ключевые слова: конструкция, масса, оптимизация, композиционный материал, испытание материала, коэффициент запаса прочности.*

## APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN EXPERIMENTAL ROCKET ENGINEERING FOR DESIGN OPTIMIZATION

A. O. Sokolova, V. V. Mayorov\*, P. V. Fadeenkov

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: viktor.majorov.01@mail.ru

*The results of composite material tests are presented. The optimization of the mass of the experimental rocket SDB "RocketLAV" is carried out. The conclusion about the usability of composite materials is made.*

*Keywords: design, mass, optimization, composite material, material testing, safety factor.*

Одной из проблем ракетно-космической и авиационной техники является проблема оптимизации массовых характеристик летательных аппаратов и их составляющих. Так, например, в последнее время прослеживается тенденция и к уменьшению числа громоздкой бортовой электроники в космических аппаратах, а также к отказу от больших, тяжёлых конструкций в пользу более лёгких. Но даже дополнительно облегчённый и качественно спроектированный корпус из металла будет уступать аналогу из композиционных материалов (КМ) в массе. Однако, масса – не единственное преимущество КМ, ещё одним важнейшим преимуществом является то, что они не уступают по прочности конструкционным сплавам, а в некоторых случаях даже оказываются более прочными.

При проектировании экспериментальной модели ракеты (ЭР) [1] перед студенческим конструкторским бюро (СКБ) «RocketLAV» встала задача поиска методов оптимизации массы конструкции. Была предпринята попытка замены силового набора ЭР с металлического на полностью композитный.

Высота подъёма ЭР не превышает двух километров, поэтому основные нагрузки конструкция испытывает на пассивном участке полёта во время срабатывания системы спасения.

Для получения сведений о КМ нами были изготовлены образцы для испытаний на разрывной машине согласно ГОСТ [2-3]. Образцы выполнены в двух вариантах плетения и типах связующего, так как в нашем объединении чаще применяются два типа расположения волокон (таблица 1), вдоль которых распространяются нагрузки [4-5]. Такой вариант прост в изготовлении и не требует освоения новых технологий производства. После испытаний были получены данные, приведённые в таблице 1.

Из опыта прошлых лет, косвенными методами была рассчитана перегрузка, которую испытывают места крепления парашюта, которая составила 600Н при массе аппарата в 9кг. Расчётная нагрузка прикладывается согласно силовой схеме на рис. 1.

Результаты испытаний

№	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon$ , %	$E$ , МПа	$\nu$	Состав композиционного материала
1	394,62	190,81	100,33	141,77	9,96	39,62	0,01	Стеклоткань ТС-26П-34, Эпоксидный компаунд Карбон М, Этал – 177, Основа
2	391,99	175,73	101,44	139,33	10,96	35,76	0,27	
3	397,71	184,00	82,45	121,11	10,43	38,12	0,03	
4	352,17	108,34	84,84	102,17	11,48	30,68	0,02	Стеклоткань ТС-26П-34, Эпоксидный компаунд Карбон М, Этал – 177, Уток
5	325,15	104,83	73,51	99,16	9,53	34,65	0,02	
6	263,03	93,54	89,37	55,19	8,35	31,50	0,06	
7	369,16	161,02	69,36	131,35	10,85	34,02	0,02	Стеклоткань ТС-26П-34, Эпоксидный компаунд ЭД-20, Этал – 45, Основа
8	351,64	170,97	72,95	118,03	10,38	33,88	0,05	
9	365,88	214,74	89,58	146,17	11,01	33,23	0,02	
10	276,95	164,58	52,22	86,73	9,93	27,89	0,03	Стеклоткань ТС-26П-34, Эпоксидный компаунд ЭД-20, Этал – 45, Уток
11	257,01	158,24	53,93	92,53	7,98	32,21	0,05	
12	273,89	178,79	54,57	104,16	10,88	25,17	0,03	

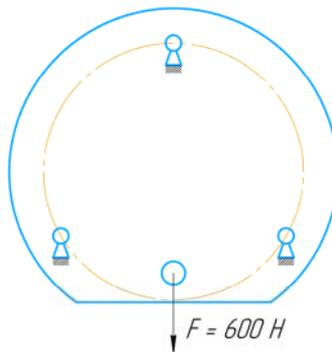


Рис. 1. Силовая схема распределения нагрузки

Эпюра, полученная в результате исследования в ПО SolidWorks [6] для КМ представлена на рис. 2. Композиционный шпангоут выполнен из двух слоёв композита и внутреннего слоя фанеры с закладным элементом из сплава Д-16. Из расчёта видно, что основную нагрузку воспринимает внутренний слой, который исключается из рассмотрения, так как он не является несущим. Как видно из эпюры минимальный коэффициент запаса прочности составляет 27 ед. для КМ.

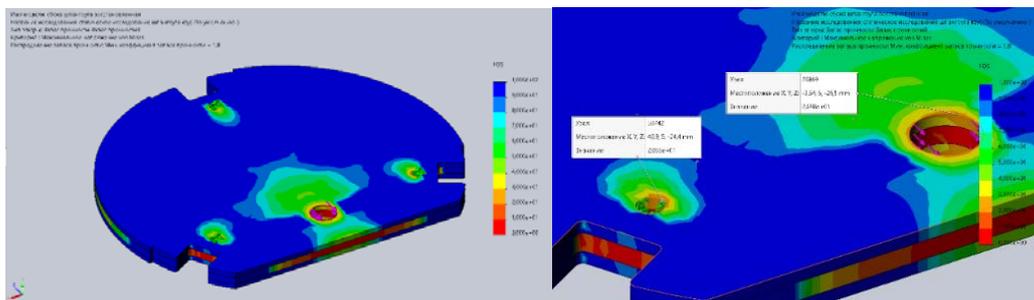


Рис. 2. Эпюра распределения коэффициента запаса прочности

Для сравнения представлен расчёт шпангоута, выполненного из сплава Д-16. В тех же условиях, предварительно оптимизировав массу шпангоута исходя из конструктивных требований, минимальный коэффициент запаса прочности составляет 11 ед. для сплава (рис. 3). Таким образом, при массе в 145 граммов и коэффициенте запаса прочности, равном 11 ед., металлический шпангоут значительно уступает аналогу из композита, имеющего массу 88 граммов и коэффициент запаса прочности, равный 27 ед.

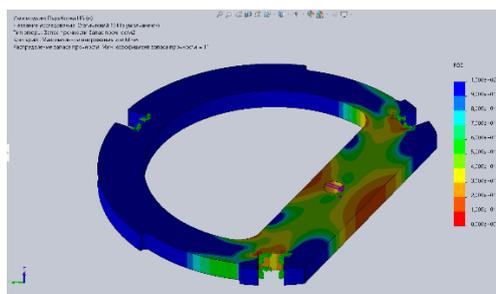


Рис. 3. Эпюра распределения коэффициента запаса прочности

Применение КМ в экспериментальном ракетостроении решает проблему оптимизации массы. Также с точки зрения доступности материалов и при отсутствии станочного парка, для многих малых предприятий применение КМ в своих разработках – наиболее экономичный вариант.

### Библиографические ссылки

10. Майоров В.В., Демина А. Ю., Фадеенков П.В. Разработка экспериментальной модели ракеты «Capella-M» с целью развития профессиональных навыков студентов // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2021, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2021. С. 36–37.
11. ГОСТ Р 56785-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов. Введ. 2017-01-01. М.: Стандартиформ, 2016. 20 с.
12. ГОСТ Р 25.601-80 Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытаний плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. Введ. 01.07.81. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 августа 1980 г. № 4448
13. Скудра, А. М. Прочность армированных пластиков / А. М. Скудра, Я. Я. Булавс. М.: Химия, 1982. 213 с.
14. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта; Под ред. Б. Э. Геллера. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. М. : Машиностроение, 1988. 446 с.
15. Справка по SOLIDWORKS [Электронный ресурс]. // Сайт «SolidWorks». URL: [https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/sldworks/r\\_help.htm](https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/sldworks/r_help.htm) (дата обращения: 24.08.2022).

### References

1. Mayorov V.V., Demina A. Y., Fadeenkov P.V. Development of experimental model of rocket "Capella-M" with the purpose of development of professional skills of students // Reshetnev readings: proceedings of XXV International Scientific Conference (10-12 November 2021, Krasnoyarsk): in 2 parts / in general ed. Krasnoyarsk, 2021. P. 36-37.
2. GOST R 56785-2015 Polymer composites. Test method for tensile properties of flat specimens [State Standard R 2017-01-01. Reliability in the sphere of inengineering. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 20 p.
3. GOST R 25.601-80 Design calculation and strength testings. Methods of Mechanical testing of Polymeric Composite Materials Test for Tensile Properties on Plane Specimens at Normal, Elevated and Low Temperatures [Decree of the USSR State Committee for Standards of August 27, 1980 N 4448 date of entry into force 01.07.81] 9 p.
4. Skudra, A. M. Strength of reinforced plastics / A. M. Skudra, J. J. Bulavs. M.: Chemistry, 1982. 213 p.
5. Handbook of Composite Materials: In 2 K. / Edited by J. Lubin; Translated from English by A. B. Geller, M. M. Helmont; Edited by B. E. Geller. M.: Machine Engineering, 1988. Kne. 1. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 446 p.
6. Help center SOLIDWORKS [Electronic resource]. // SolidWorks site. URL: [https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/sldworks/r\\_help.htm](https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/sldworks/r_help.htm) (date of access: 24.08.2022).

УДК 533.696

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ОБЛАСТИ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ НЕОДИНАКОВЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ**

В. С. Фаворский

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

*Исследование течений, обладающих неоднозначной структурой конфигураций течения жидкости и газа представляет собой сложную проблему. Накопленный опыт анализа неоднозначных структур течения встречных соосных симметричных сверхзвуковых струй позволят рассматривать более сложные варианты течений, в частности – пространственное взаимодействие не соосных сверхзвуковых струй разной интенсивности. Анализ причин возникновения таких режимов позволяет учитывать данные результаты при проектировании технических устройств.*

*Ключевые слова: сверхзвуковые струи, неоднозначность, гистерезис, нестационарность, неустойчивость, взаимодействие, поле течения.*

## **IDENTIFICATION OF THE AREA OF AMBIGUITY OF THE STRUCTURE OF THE EXTENDED INTERACTION OF COUNTER UNEQUAL SUPERSONIC JETS**

V. S. Favorskiy

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

*The investigation of nonunique configurations of fluid and gas flows are difficult and complex problem of hydrogasdynamics. The reason's detection of appearance of these regimes in engineering of new technical equipments permits to achievement higher characteristics*

*Keywords: supersonic jets, ambiguity, hysteresis, nonstationarity, instability, interaction, flow field, non-uniqueness*

Потеря устойчивости симметричной конфигурации течения, зачастую, связана со спонтанными переходами между двумя устойчивыми конфигурациями [1]. Значительные успехи в вычислительном моделировании течений, как и физический эксперимент, позволяют выявлять лишь статически устойчивые конфигурации течения или зависимость получаемой асимметрии от предыстории формирования поля течения [2] и не снимают необходимость формирования приближенных моделей, необходимых для выявления природы и предпосылок появления несимметричных конфигураций в симметричных постановках, предсказания условий для возникновения таких режимов.

Структура сверхзвуковых струй, содержит целый ряд элементов течения, характеризующихся собственными особенностями и закономерностями: криволинейные и прямые скачки уплотнения, зоны свободного расширения и дозвуковых течений. В струе формируется висячий скачок уплотнения, охватывающий зону свободного расширения, замыкаемую прямым скачком уплотнения. Висячий и прямой скачки уплотнения взаимодействуют в тройной точке. Из тройной точки, как результат взаимодействия, выходят отраженный скачок уплотнения и тангенциальный разрыв. В случае натекания сверхзвуковой струи на препятствие или другую сверхзвуковую струю в результате сложного наложения многих особенностей сверхзвуковых течений и структуры сверхзвуковой струи образуется поле течений, обладающее суммарным свойством азимутальной неоднородности силового воздействия на обтекаемое препятствие. Приближенную аппроксимацию силового воздействия на обтекаемое препятствие можно построить на основе численных и экспериментальных результатов по натеканию сверхзвуковой струи на препятствия с разным пространственным положением, формой и наклоном [3]. Исследование встречного взаимодействия двух сверхзвуковых струй, когда оси сопел лежат в од-

ной плоскости и пересекаются под углом  $120^\circ$  проведено в работах [1, 4]. В результате исследований выявлен диапазон расстояний, характеризующийся наличием равновероятных асимметричных конфигураций структуры течения, переход между которыми происходит со значительным гистерезисом при выходе на режим по давлению в одной из струй. В данных экспериментах выявлены диапазон параметров и область течения, в пределах которой симметричная картина течения не реализуется. Физический эксперимент проводился на плотных струях воздуха, истекающих в атмосферу с нормальным давлением, и разреженных струй, истекающих в барокамеру при давлении внешней среды 100 Па. Для разреженных струй характерны устойчивая картина течения без автоколебательных режимов газодинамической структуры. Для взаимодействия плотных струй, напротив, картина течения характеризуется спонтанными, перемежаемыми переходами между двумя устойчивыми конфигурациями, причем спектр релаксационных автоколебаний не имеет определенной дискретной составляющей, что свойственно процессам со случайным значением интервала времени между перестройками течения.

Определение причины возникновения асимметричных устойчивых конфигураций при взаимодействии двух одинаковых струй в симметричных условиях было продолжено при исследовании взаимодействия не симметричных струй. Результаты модельных построений взаимодействия существенно разных струй на основе использования приближенной модели силового воздействия на препятствие позволяют предсказывать пространственное местоположение области неоднозначности как показано на рисунке образующую  $\phi$ -образную конфигурацию положений разделяющей потоки контактной поверхности (см. рисунок). Как показал анализ изменения параметров, центральная часть  $\phi$ -образной конфигурации обладает отрицательной пространственной устойчивостью и не может быть получена в численных и физических экспериментах.



Область двузначности  
положения разделяющей  
потоки контактной поверхности

### Библиографические ссылки

1. Favorskiy V. S., Sokolov E. I., Shatalov I. V. //Influence of the angle between nozzle axes on interaction of two identical supersonic jets // Thermophysics and aeromechanics, 2000, vol.7, No.1, PP. 47-53.
2. Ivanov M. S., Vandromme D., Fomin V. M., Kudryavtsev A. N., Hadjadj A., Khotyanovsky D. V. Transition between regular and Mach reflection of shock waves: new numerical and experimental results // Shock Waves. 2001. V. 11. N. 3. PP. 199–207.
3. Favorskiy V. S., Gorshkov G.F., Uskov V.N., Non stationary flow an underexpanded jet around an unbounded obstacle, J. Appl. Mech. Tech. Phys., 1993, Vol. 34, No 1, PP. 41-48.
4. Фаворский В. С. Анализ устойчивости структуры и гистерезиса сверхзвуковых струйных взаимодействий по критерию Неймана // Тезисы XXVI Всероссийского семинара с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям /СПб Балтийский государственный технический университет, 2022 с.186-187.

### References

1. Favorskiy V.S., Sokolov E.I., Shatalov I.V. //Influence of the angle between nozzle axes on interaction of two identical supersonic jets //Thermophysics and aeromechanics, 2000, vol.7, No.1, PP. 47-53.
2. Ivanov M.S., Vandromme D., Fomin V.M., Kudryavtsev A.N., Hadjadj A., Khotyanovsky D.V. Transition between regular and Mach reflection of shock waves: new numerical and experimental results // Shock Waves. 2001. V. 11. N. 3. PP. 199–207.
3. Favorskiy V.S., Gorshkov G.F., Uskov V.N., Non stationary flow an underexpanded jet around an unbounded obstacle, J. Appl. Mech. Tech. Phys., 1993, Vol. 34, No 1, PP. 41-48.
4. Favorskiy V.S. Analysis of the stability of the structure and hysteresis of supersonic jet interactions according to the Neumann criterion // Theses of the XXVI All-Russian Seminar with International Participation on Jet, Detachable and Non-Stationary Currents /St. Petersburg Baltic State Technical University, 2022 p.186-187.

УДК 533.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ПЕРСПЕКТИВНОГО САМОЛЕТА НА УЛАК-1

В. С. Фаворский

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

*В процессе проектирования и отработки компоновки летательного аппарата существенно место занимает аэродинамический эксперимент. Степень достоверности результатов, полученных при испытании моделей, зависит от соблюдения условий эксперимента и критериев подобия. Важнейшим является соблюдение геометрического подобия. С целью верификации исследований компоновки одного из вариантов перспективного четырехдвигательного летательного аппарата на аэродинамическом комплексе УЛАК-1 Сибирского государственного университета и науки и технологии была изготовлена модель самолета первого класса и проведены исследования аэродинамических характеристик.*

*Ключевые слова: Экспериментальная аэродинамика, аэродинамическая труба, аэродинамические характеристики, перспективный четырехдвигательный самолет.*

## STUDY OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE MODEL OF A PROMISING AIRCRAFT ON THE AERODYNAMIC COMPLEX ULAC-1

V. S. Favorskiy

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

*In the process of designing and working out the layout of the aircraft, an aerodynamic experiment occupies a significant place. The degree of reliability of the results obtained during the testing of models depends on the compliance with the experimental conditions and similarity criteria. The most important is the observance of geometric similarity. In order to verify the layout of one of the variants of the promising four-engine aircraft on the aerodynamic complex ULAC-1 of the Reshetnev Siberian state university of science and technology, a model of the first-class aircraft was manufactured and aerodynamic characteristics were studied.*

*Keywords: experimental aerodynamics, wind tunnel, aerodynamic characteristics, advanced four-engine aircraft.*

Современные компоновки самолетов отличаются большим размахом крыла, оперения, длиной фюзеляжа [1]. В процессе проектирования геометрически подобной модели перспективного четырехдвигательного было выдержано профилирование крыла и оперения с учетом геометрической и аэродинамической круток (рис. 1). Изготовленная в масштабе 1:128 модель устанавливается на внутримодельные тензосенсоры, которые позволяют провести качественный сравнительный анализ влияния геометрических параметров крыла и оперения на величины аэродинамических сил, коэффициентов и моментов.

Вертикальное и горизонтальное оперение выполнены цельноповоротными с углами отклонения  $\delta$  от  $-40^\circ$  до  $+40^\circ$ . Вертикальное оперение набрано из профилей NASA 0012, а горизонтальное оперение из профилей NASA 0009 [2]. Угол установки корневой части крыла составляет  $+3^\circ$ . Для снижения индуктивного сопротивления геометрическая крутка крыла линейно изменяется с нулевого значения и для концевой части составляет  $-3^\circ$ . Таким образом, концевое сечение имеет нулевой угол установки относительно фюзеляжа. Вдоль размаха крыла отрицательная кривизна профиля изменяется до положительного значения, а относительная толщина от 14% у корневого профиля до 10% у внутренних

пилонов двигателей и далее остается постоянной. Модели мотогондол выполнены в виде цилиндров с проточной частью для воспроизведения реального коэффициента лобового сопротивления.

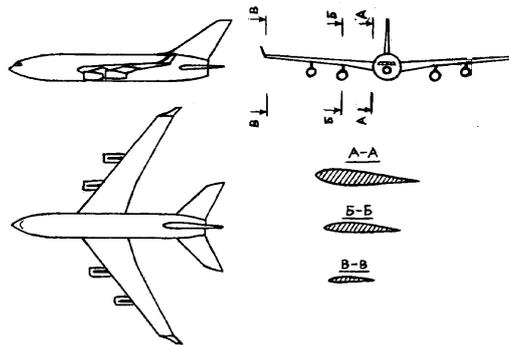


Рис. 1. Модель самолета

Установленный в Сибирском государственном университете науки и технологии аэродинамический комплекс УЛАК-1 включает аэродинамическую низкотурбулентную трубу дозвуковых скоростей замкнутого типа с открытой рабочей частью (рис. 2, 3). Длина рабочей части составляет 1000 мм., выходное сечение 400 x 600 мм<sup>2</sup>. Скорость потока в рабочей части от 15 до 60 м/с. Механизм изменения угла атаки и скольжения обеспечивает перемещение модели по двум угловым координатам. Диапазон перемещения  $\alpha$ -механизма по углу  $\alpha$  от  $-10$  до  $+20^\circ$ , по углу  $\beta$  от  $-20$  до  $+20^\circ$  с точностью установки 0,1 град. по  $\alpha$  и  $\beta$ . Координатное устройство позволяет перемещать приемник давления в пределах рабочей части трубы. Точность установки 0,5 мм. Учебный комплекс УЛАК-1 отвечает основным требованиям, предъявляемым к аэродинамическим трубам, и укомплектован необходимыми приборами и устройствами.

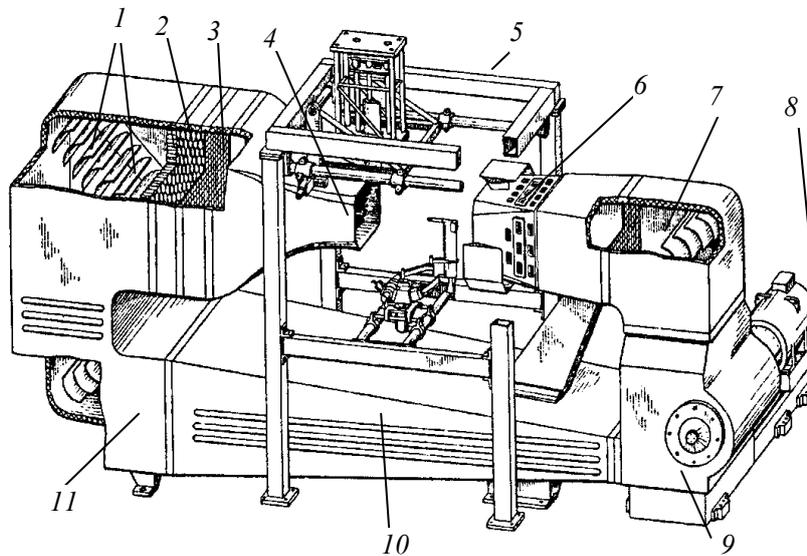


Рис. 2. Аэродинамический комплекс УЛАК-1:

- 1 – направляющие лопатки; 2 – хонейкомб; 3, 7 – сетки; 4 – сопло; 5 – координатное устройство;  
6 – диффузор; 8 – электродвигатель; 9 – вентиляторная установка;  
10 –  $\alpha$ -,  $\beta$ -механизм для изменения угла атаки и угла скольжения; 11 – воздушный канал

Информационно-измерительная управляющая система и программное обеспечение позволяет:

- поддерживать на УЛАК-1 заданный режим работы по скоростному напору;
- задавать движение модели ступенчато и с заданными угловыми скоростями;
- обеспечить автоматизированный ввод и вывод информации;
- обрабатывать информацию в реальном масштабе времени;
- выводить информацию на монитор в виде графических зависимостей
- регистрировать в заданные моменты времени данные о быстро протекающих процессах

С использованием данной модели можно проводить следующие исследовательские работы:

- Определение аэродинамических характеристик модели самолета;
- Определение критического угла атаки;
- Исследование влияния отклонения горизонтального оперения на величину момента тангажа и балансировочного угла атаки и другие.

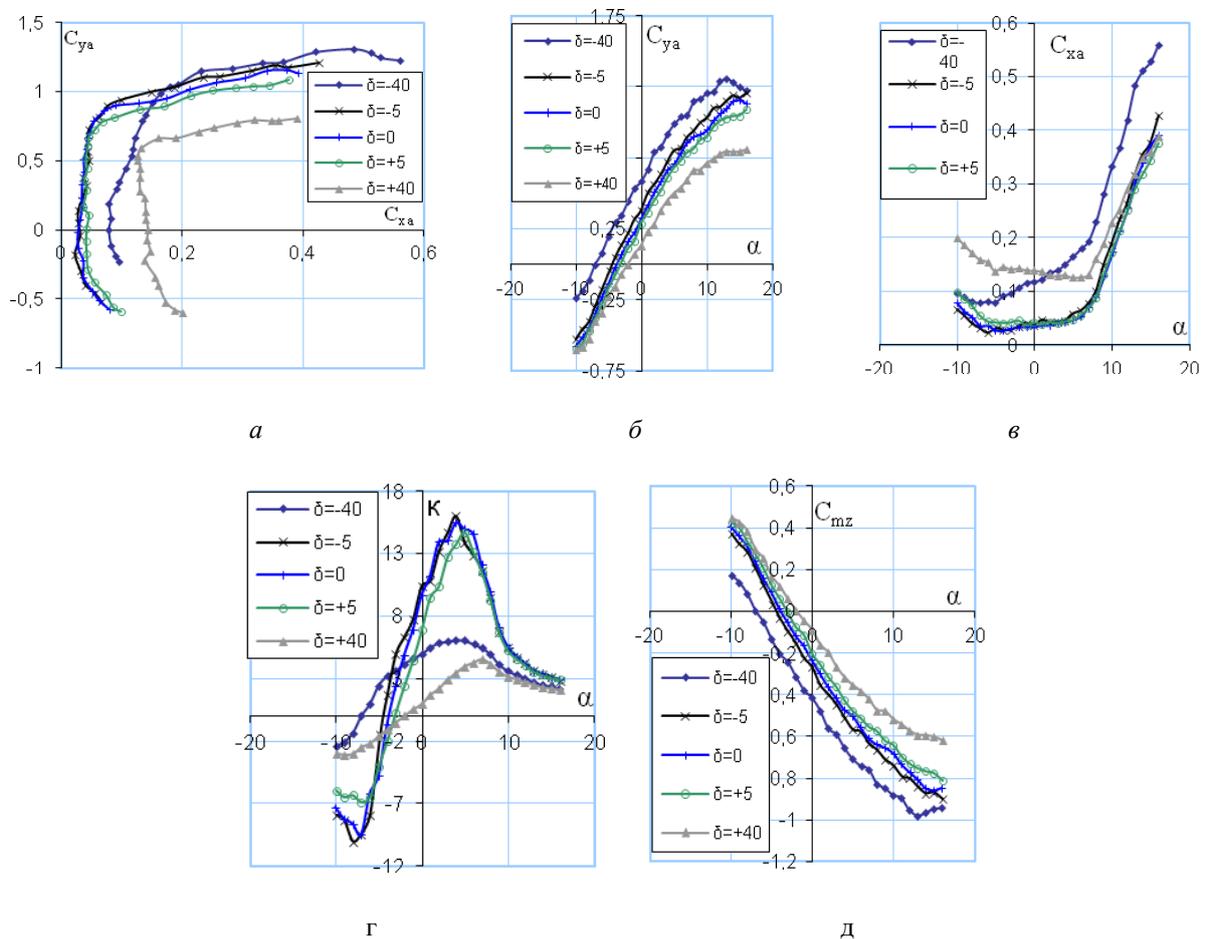


Рис. 3. Аэродинамические характеристики модели

После изготовления модели была проведена серия экспериментов, позволившая получить ее аэродинамические характеристики и определить влияние угла отклонения горизонтального оперения на величину балансировочного угла атаки. Аэродинамическое качество модели составило 15 единиц, что соответствует реальному самолету.

### Библиографические ссылки

1. Назаров Д. В., Никитин А. Н., Тарасова Е. В. Экспериментальная аэродинамика: Учебное пособие. Самара: Издательство Самарского университета 2020. 176 с.
2. Кашафутдинов С. Т., Лушин В. Н. Атлас аэродинамических характеристик крыловых профилей. Новосибирск: Издательство Сибирского научно-исследовательского института авиации им. С. А. Чаплыгина, 1994 75с.

### References

1. Nazarov D. V., Nikitin A. N., Tarasova E. V. Experimental aerodynamics: Textbook Samara: Samara University Press 2020. 176 p.
2. Kashafutdinov S. T., Lushin V. N. Atlas of aerodynamic characteristics of wing profiles. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin, 1994 75 p.

УДК 691.175.5

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РКТ

А. Я. Шамлицкий

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

*В работе представлен анализ направлений применений композиционных материалов, указаны основные термины присущие композиционным материалам, а также их перспективы развития.*

*Ключевые слова: композиционные материалы, применение композиционных материалов.*

## PROMISING TECHNOLOGIES FOR THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN RCT

A. Ya. Shamlitskiy

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

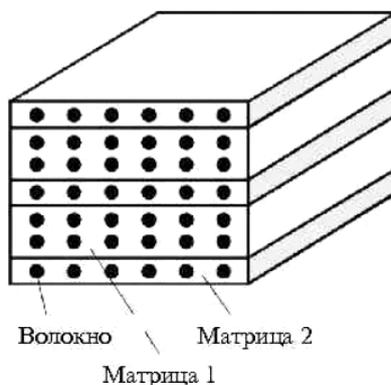
*The paper presents an analysis of the directions of applications of composite materials, indicates the main terms inherent in composite materials, as well as their prospects for development.*

*Keywords: composite materials, application of composite materials.*

В современной аэрокосмической технике широкое использование получили разные материалы, такие как металлы, полимеры, интерметаллиды, композиционные материалы и множество других материалов. Например, композиционные материалы используются почти во всех аэрокосмических устройствах.

Для понимания о чём идёт речь стоит обратиться к определению композиционных материалов. Это материалы созданные искусственно человеком, который состоит из компонентов, от двух и более, с абсолютно различными физическими или химическими свойствами, при взаимодействии друг с другом образуют новый материал с характеристиками не похожими на характеристики компонентов в отдельности [1].

Рассмотрим строение композиционного материала (см. рисунок).



Строение композиционного материала

Обычно в составе композита выделяют матрицу и наполнитель. Матрица является в роли связующего, которая выполняет функции защиты наполнителя от физических и химических воздействий различных сред в которых она находится. Наполнитель является армирующим элементом в композите.

В настоящее время композиционные материалы занимают лидирующую строчку по популярности и частоте использования в авиастроении и ракетостроении, так как большинство таких материалов легче и прочнее чем металлические сплавы алюминия и титана которые наиболее подходят по своим физическим свойствам для изготовления летательного аппарата [2].

Одной из основных задач при проектировании космического летательного аппарата является снижение веса летательного аппарата, так как при снижении веса летательный аппарат сможет перемещать больше полезного груза на борту [3]. Сэкономить на весе как раз получится из-за небольшого веса композиционных материалов, но не только небольшой вес важен летательному аппарату, но и прочность и способность композиционных материалов сопротивляться низким и высоким температурам [4]. Для сравнения возьмём самые часто используемые материалы такие как алюминиевый сплав, титановый сплав, нержавеющая сталь, органопластик, стеклопластик, углепластик, бороалюминий и сравним их по предельной прочности, плотности, а также удельной прочности (см. таблицу) [5].

**Сравнительные свойства композиционных материалов и металлов, используемых в РКТ**

Материал	Предел прочности, $\sigma_n$ , МПа	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная прочность, $\sigma_n / \rho \cdot 10^3$ , м <sup>2</sup> / с <sup>2</sup>
1. Алюминиевый сплав (АМг6)	400	2640	0,152
2. Титановый сплав (BT23)	1600	4443	0,360
3. Нержавеющая сталь (12Х18Н10Т)	650	7920	0,082
4. Органопластик	1500	1200	1,250
5. Стеклопластик	1700	1600	1,063
6. Углепластик	1700	1300	1,308
7. Бороалюминий	800	750	1,067

Из таблицы видно, что для летательных аппаратов в большей степени по удельной прочности композиционного материала подходит углепластик.

Композиционные материалы применяются не только в авиастроении и ракетостроении, но и в наземном транспорте, химическом машиностроении, медицине, спорте, туризме, образовании [6]. Хороший примером применения композиционных материалов является крыло для самолёта МС-21 оно изготовлено из углепластика, так как при проектировании самолётов, конструкторы стараются увеличить размеры крыла, для увеличения подъёмной силы и экономии топлива при полёте, но изготовить его из алюминия не представлялось возможным из-за того, что алюминий мягкий металл и появлялся прогиб крыла.

Обычно удлинение крыла не превышало 9 метров, но из-за жёсткости углепластика удалось достичь показателей 11,5 метров [7].

Перспективы развития композиционных материалов очень обширны, с появлением композиционных материалов появляется возможность создать устройства, которые не представлялось возможным создать с обычными материалами. Со временем совершенствуясь композиционные материалы смогут заменить уже существующие материалы, в ракетно-космической технике композиционные материалы смогут уменьшить вес, повысить прочность устройства, также в авиастроении, медицине, архитектуре и в других направлениях [8].

Подводя итоги хочется сказать, композиционные материалы активно развиваются и совершенствуются, без них сложно представить работу некоторых устройств, так-как они сочетают в себе относительно небольшую стоимость производства, высокую прочность, небольшой вес, отличное сопротивление различным внешним воздействиям. Учитывая активное развитие промышленности, что неизбежно влечет за собой активное применение различных материалов, можно сделать вывод, что композиционные материалы будут востребованы ещё долгое время.

### Библиографические ссылки

1. История композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/362189> (дата обращения: 20.08.2022).
2. Композитный материал [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Композитный\\_материал](https://ru.wikipedia.org/wiki/Композитный_материал) (дата обращения: 20.08.2022).
3. Композиционные материалы [Электронный ресурс]. URL: <http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/4ee22d2b-8dcc-9308-877a-53118dc6979e/1012459A.htm> (дата обращения: 21.08.2022).
4. Композиционные материалы [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/7078> (дата обращения: 21.08.2022).
5. Композиционные материалы [Электронный ресурс]. URL: <https://extxe.com/14772/kompozicionnye-materialy> (дата обращения: 21.08.2022).
6. Композиционные или композитные материалы свойства и классификация композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://e-plastic.ru/specialistam/composite/kompozicionnye-materialy> (дата обращения: 21.08.2022).
7. Композиционный материал [Электронный ресурс]. URL: <https://epolymer.ru/article/vidy-i-primeneniye-kompozitnyh-materialov> (дата обращения: 22.08.2022).
8. Полимерные композиционные материалы: основные типы [Электронный ресурс]. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/110> (дата обращения: 22.08.2022).

### References

1. History of composite materials. Available at: <https://habr.com/ru/post/362189> (accessed 20.8.2022).
2. Composite material. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Composite material](https://ru.wikipedia.org/wiki/Composite_material) (accessed 20.8.2022).
3. Composite materials. Available at: <http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/4ee22d2b-8dcc-9308-877a-53118dc6979e/1012459A.htm> (accessed 21.8.2022).
4. Composite materials. Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/7078> (accessed 21.8.2022).
5. Composite materials. Available at: <https://extxe.com/14772/kompozicionnye-materialy> (accessed 21.8.2022).
6. Composite or composite materials properties and classification of composite materials. Available at: <https://e-plastic.ru/specialistam/composite/kompozicionnye-materialy> (accessed 21.8.2022).
7. Composite material. Available at: <https://epolymer.ru/article/vidy-i-primeneniye-kompozitnyh-materialov> (accessed 22.8.2022).
8. Polymer composite materials: the main types. Available at: <https://plastinfo.ru/information/articles/110> (accessed 22.8.2022).

© Шамлицкий А. Я., 2022

УДК 629.7.017.1

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ

К. П. Шатных, М. Г. Елиразьева, Г. Д. Коваленко

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

*В работе рассмотрены общие вопросы разработки схемы цилиндрического крыльчато – вихревого движителя на основе эффекта Магнуса, а также применение систем опрыскивания растений с применением беспилотных летательных аппаратов в сельскохозяйственной обработке.*

*Ключевые слова: эффект Магнуса, цилиндрический крыльчато – вихревой движитель, химическая защита растений, беспилотный летательный аппарат, опрыскивание.*

## ANALYSIS OF UAV APPLICATION FOR AGRICULTURAL PROCESSING

K. P. Shatnykh, M. G. Elirazieva, G. D. Kovalenko

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

*The paper considers the general issues of developing a scheme of a cylindrical vane-vortex mover based on the Magnus effect, as well as the use of plant spraying systems on unmanned aerial vehicles in agricultural processing.*

*Keywords: Magnus effect, cylindrical vane-vortex mover, chemical plant protection, unmanned aerial vehicle, spraying.*

### Введение

Актуальностью работы является разработка схемы цилиндрического крыльчато – вихревого движителя на основе эффекта Магнуса. Применение нового движителя на беспилотных летательных аппаратах в сельскохозяйственной обработке растений.

Эффект Магнуса – физическое явление, возникающее при обтекании вращающегося тела потоком жидкости или газа. Образуется сила, действующая на тело и направленная перпендикулярно направлению потока. Вращающийся объект создаёт в среде вокруг себя вихревое движение [1].

В сельскохозяйственной обработке растений, важную роль играет химическая защита разных видов культур. Химической защита растений – система мероприятий по защите растений и продукции растительного происхождения от вредных организмов с помощью химических средств, а также раздел науки о защите растений [2].

К основным приёмам химической защиты растений относятся: протравливание, инкрустация семян, опрыскивание, фумигация, применение пестицидных аэрозолей, химиотерапия растений, десикация.

Опрыскивание – это процесс распыления воды или какого-либо раствора на листья растений. Цели опрыскивания могут быть разными – увлажнение окружающей растения среды, листовая подкормка, обработка от болезней и вредителей [3].

Системы опрыскивания, создающие поток распыленной рабочей жидкости, классифицируют по следующим критериям: по назначению – на полевые, садовые и универсальные; типу распыливающего устройства – штанговые (дробление жидкости осуществляется от давления насоса) и вентиляторные (дробление жидкости воздухом); по способу агрегатирования – на тракторные (прицепные, навесные, полу навесные), самоходные, авиационные, тачечные и ранцевые. При применении пестицидов в основном используют штанговые и вентиляторные опрыскиватели (дистанционные).

Распылители: щелевые распылители, инжекторные, распылители, дефлекторные распылители, центробежные (вихревые). В нашем случае для ЦВД будет использоваться вентиляторный метод опрыскивания[4].

Технологично оснащенные беспилотные летательные аппараты в сельском хозяйстве способны выполнять разнообразные операции: аэрофотосъемку, видеосъемку, 3D моделирование, тепловизионную съемку, лазерное сканирование, опрыскивание.

Преимущества использования БПЛА в сельском хозяйстве перед традиционными средствами: высокая эффективность использования, экономия времени, экономия денег, точность обработки с/х угодий, за счет небольшой высоты нет риска опрыскивания чужой территории, можно использовать ночью, многократное использование, дистанционное картографирование, использование в сельскохозяйственных работах. Преимущества использования 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 [5].

В рамках исследовательской работы был проведён расчет аэродинамики и компоновки цилиндрического крыльчато – вихревого движителя применительно к эксплуатации БПЛА для обслуживания малых сельхозугодий.

Разработан общий вид схемы ЦВД 22 для предварительной оценки технических характеристик установки, рис. 1.

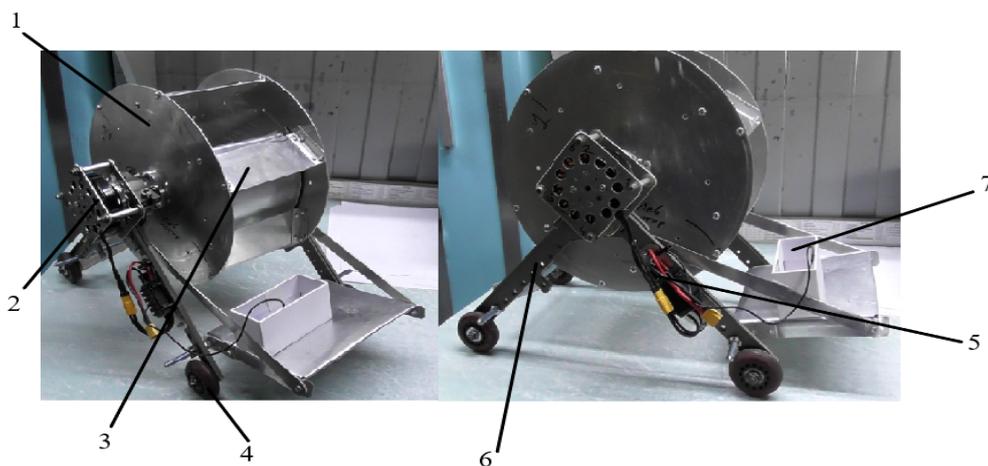


Рис. 1. Общий вид конструкции ЦВД 22  
1 – диск, 2 – электрический двигатель, 3 – лопатка, 4 – шасси, 5 – аккумулятор, 6 – блок управления, 7 – рама

Принцип работы ЦВД, на лопатках барабана образуются высокая циркуляция завихрений и происходит эффект Магнуса, в результате совокупности двух явлений на барабане, он приобретает подъёмную силу.

Ниже представлена предварительная схема соединения установки и системы опрыскивания (рис. 2).

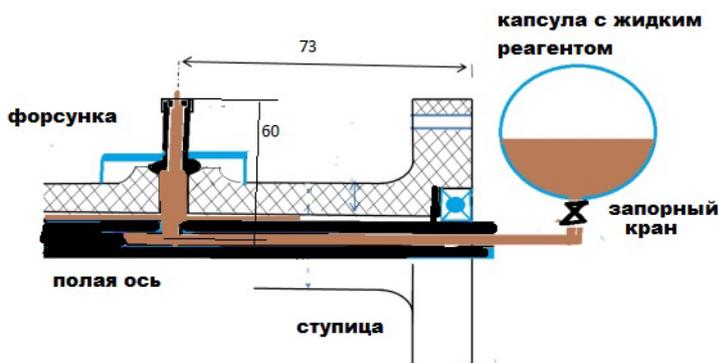


Рис. 2. Примерная схемы соединения установки с системой опрыскивания

В полете ЦКВД с помощью опрыскивающей системы распыляет раствор(реагент) на растения. Благодаря этому человек может удаленно, без вреда для здоровья, заниматься сельскохозяйственной обработкой растений.

#### **Заключение**

Сочетание комплекса создающего подъемную силу с эффектом Магнуса и системы опрыскивания позволяет получить новый беспилотный летательный аппарат с широким спектром применения для обработки малых сельхозугодий.

#### **Библиографические ссылки**

1. Эффект Магнуса : сайт Википедия. Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект\\_Магнуса](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Магнуса) (дата обращения: 11.09.2022). Текст: электронный.
2. Химическая защита растений: сайт Википедия. Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Химическая\\_защита\\_растений](https://ru.wikipedia.org/wiki/Химическая_защита_растений) (дата обращения: 11.09.2022). Текст: электронный.
3. Dzagigrow: Блог. Опрыскивание растений: как и когда применять? URL: <https://dzagigrow.ru/blog/opryskivanie-rasteniy-kak-i-kogda-primenyat/> (дата обращения: 11.09.2022). Текст: электронный.
4. Современное производство и техника: Машины для химической защиты растений. URL: [https://itexn.com/9981\\_mashiny-dlja-himicheskoy-zashhity-rastenij.html](https://itexn.com/9981_mashiny-dlja-himicheskoy-zashhity-rastenij.html) (дата обращения: 11.09.2022). Текст: электронный.
5. ГЕОМИР: Беспилотники в сельском хозяйстве URL: <https://www.geomir.ru/publikatsii/bespilotniki-v-selskom-khozyaystve/> (дата обращения: 11.09.2022). Текст: электронный.

#### **References**

1. Magnus effect: Wikipedia site. Free Encyclopedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Magnus\\_Effect](https://ru.wikipedia.org/wiki/Magnus_Effect) (date of access: 09/11/2022). Text: electronic.
2. Chemical plant protection: Wikipedia site. Free Encyclopedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Chemical\\_protection\\_of\\_plants](https://ru.wikipedia.org/wiki/Chemical_protection_of_plants) (date of access: 09/11/2022). Text: electronic.
3. Dzagigrow: Blog. Spraying plants: how and when to apply? URL: <https://dzagigrow.ru/blog/opryskivanie-rasteniy-kak-i-kogda-primenyat/> (date of access: 09/11/2022). Text: electronic.
4. Modern production and technology: Machines for chemical plant protection. URL: [https://itexn.com/9981\\_mashiny-dlja-himicheskoy-zashhity-rastenij.html](https://itexn.com/9981_mashiny-dlja-himicheskoy-zashhity-rastenij.html) (date of access: 09/11/2022). Text: electronic.
5. GEOMIR: UAVs in agriculture URL: <https://www.geomir.ru/publikatsii/bespilotniki-v-selskom-khozyaystve/> (date of access: 11.09.2022). Text: electronic.

© Шатных К. П., Елеразьева М. Г., Коваленко Г. Д., 2022

УДК 629.76/78.001.63

## ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ТОЛЩИН СЛОЕВ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА СВОЙСТВА ПАКЕТА СЛОЕВ

А. В. Шатов, С. А. Пикулин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*Произведена оценка влияния неточности определения толщин слоев углепластикового композитного материала на точность определения характеристик пакета слоев.*

*Ключевые слова: схема армирования, коэффициент температурного расширения, углепластик*

## THE EFFECT OF THE DEVIATION OF THE THICKNESS OF THE COMPOSITE MATERIAL LAYERS ON THE PROPERTIES OF THE LAMINATE

A. V. Shatov, S. A. Pikulin

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*The influence of the inaccuracy of determining the thicknesses of layers of carbon fiber composite material on the accuracy of determining the characteristics of the laminate is estimated.*

*Keywords: reinforcement scheme, coefficient of thermal expansion, carbon fiber*

В космических аппаратах применяются элементы конструкции из композиционных материалов в виде тонкостенных труб: штанги антенн, каркас солнечных батарей и другие [1]. Данные элементы позволяют добиваться минимальной массы конструкции КА при выполнении заданных требований за счет выбора схем армирования и количества слоев, выбора материала.

Одним из возможных вариантов изготовления подобных труб является метод мокрой намотки [2], в качестве наполнителя в основном используются углеродные волокна в виде жгутов, в качестве связующего – эпоксидная смола. В процессе изготовления жгут непосредственно перед намоткой на оправку пропитывается связующим. Намотка осуществляется под требуемыми углами до заполнения всех слоев.

Характеристики изготовленной трубы могут отличаться от расчетных ввиду следующих причин [3]:

1. несоответствие характеристик наполнителя и связующего принятым в расчетах
2. отклонения реальных толщин слоев от задаваемых на этапе проектирования;
3. отклонения, возникающие в процессе производства:
  - 3.1 отклонения углов намотки от требуемых значений;
  - 3.2 отклонение объемного содержания связующего от значения, задаваемого на этапе проектирования;
4. процессы, происходящие с композиционным материалом в процессе отверждения (полимеризация, десорбция влаги и др.);

В данной работе рассмотрено влияние отклонения толщин слоев на характеристики трубы.

Ввиду того, что жгут углепластика состоит из множества отдельных волокон, под действием сил натяжения, возникающих в процессе намотки на цилиндрическую оправку, жгут будет сплющиваться. Толщина слоя при этом будет зависеть от угла намотки.

Необходимо произвести оценку, как отклонения толщин слоев влияют на характеристики трубы. В частности, рассматриваются модуль упругости вдоль оси трубы, модуль сдвига материала трубы, КТР вдоль оси трубы для трубы из углепластика КМУ М46J.

При известных характеристиках слоя свойства пакета слоев определяются их ориентацией относительно базового направления и количеством слоев с заданным углом укладки (схемой армирования). Свойства пакета слоев могут быть рассчитаны в соответствии с теорией слоистых композиционных материалов [4, 5].

Были рассмотрены пакеты, состоящие из двух слоев. В один слой входит два монослоя с углами армирования равными по величине, но противоположными по знаку. Схема армирования запишется как  $[\pm A/\pm B]$ , где  $A$  и  $B$  – различные углы намотки. Определялось влияние отклонений толщин слоев на механические характеристики данных пакетов. При этом суммарная толщина стенки задавалась постоянной.

Пусть  $k$  – отношение толщины стенки первого слоя ( $t_1$ ) к суммарной толщине стенки ( $t$ ). Тогда толщина второго слоя:  $t_2 = t(k - 1)$ .

Далее были построены зависимости механических характеристик материала трубы от величины  $k$  (рис. 1–3). Исходная толщина стенки – 0,4 мм.

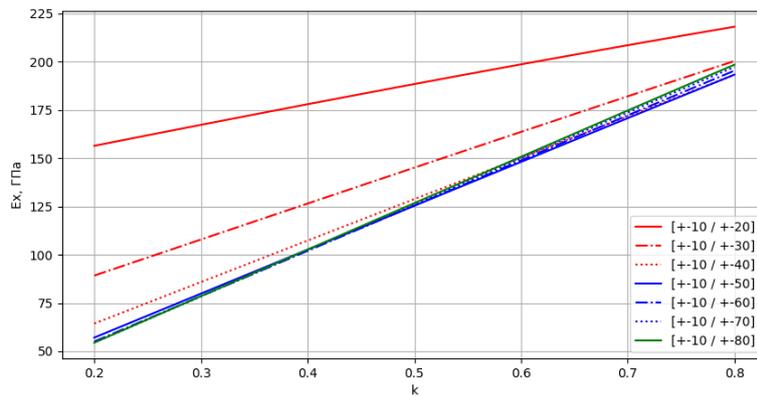


Рис. 1. Зависимость модуля упругости от доли толщины первого слоя в суммарной толщине стенки

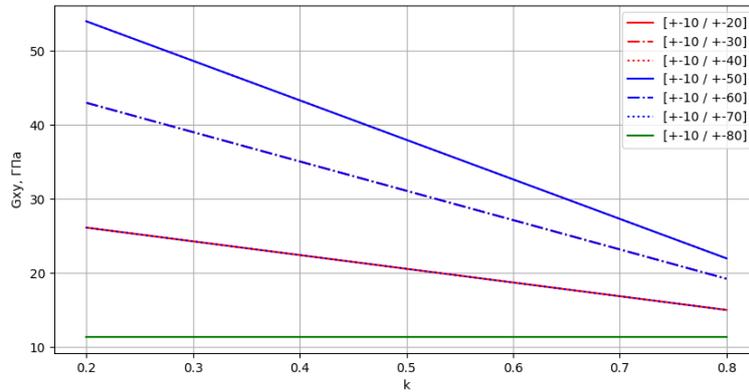


Рис. 2. Зависимость модуля сдвига от доли толщины первого слоя в суммарной толщине стенки

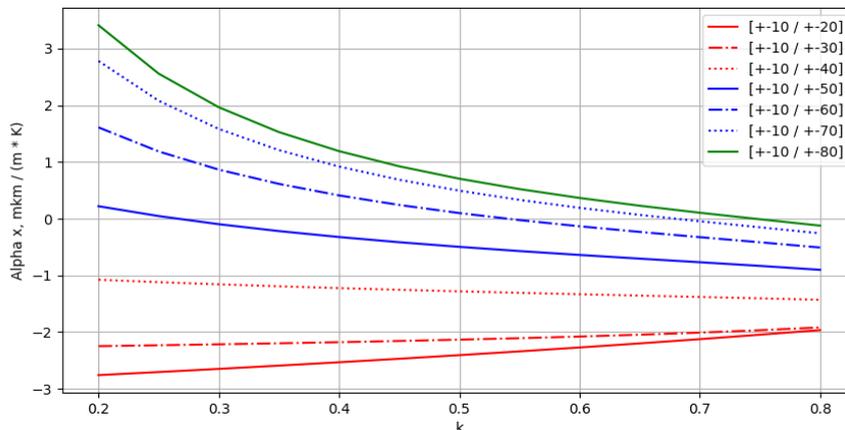


Рис. 3. Зависимость КТР от доли толщины первого слоя в суммарной толщине стенки

Модуль упругости вдоль оси трубы и КТР более чувствительны к неправильному определению соотношения толщин слоев с разными углами намотки, когда данные углы сильно отличаются.

Для модуля сдвига зависимость иная: максимальные отклонения наблюдаются при схеме армирования  $[\pm 10/\pm 50]$ . Для схем  $[\pm 10/\pm 20]$  и  $[\pm 10/\pm 70]$  чувствительность к неправильному определению толщин значительно меньше, а для схемы  $[\pm 10/\pm 80]$  минимальна (среди рассматриваемых).

При этом для модуля упругости вдоль оси трубы и модуля сдвига зависимости практически линейные, поэтому чувствительность к неточности определения толщин слоев можно представить, как угловой коэффициент прямой и считать постоянной для заданной схемы армирования. Для КТР чувствительность к неточности определения толщин слоев является нелинейной.

Добиться требуемых параметров трубы можно двумя способами: учитывать на этапе проектирования толщины слоев в зависимости от угла армирования или подбирать на этапе отработки технологии намотки количество жгутов в слое таким образом, чтобы обеспечить требуемую толщину. При увеличении количества жгутов в слое для обеспечения требуемой толщины возникает перекрытие жгутов, что может привести к увеличению объемной доли связующего в материале трубы и к снижению характеристик. Значительное перекрытие жгутов наиболее характерно для толстостенных труб. Таким образом можно сделать вывод, что для толстостенных труб необходимо определять толщины слоев в зависимости от угла армирования и использовать полученные значения на этапе проектирования трубы. Для тонкостенных труб более эффективным способом может оказаться подбор количества жгутов в слое на этапе отработки технологии намотки. И в том и в другом варианте толщина слоя должна быть определена с достаточной точностью (по крайней мере не превышающей 10% от толщины слоя) для обеспечения возможности прогнозирования характеристик материала трубы.

#### Библиографические ссылки

1. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учебное пособие. А. В. Туманов, В. В. Зеленцов, Г. А. Щеглов. 3-е изд., испр. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 572 с.
2. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие / М. А. Комков, В. А. Тарасов. М. :Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
3. A. Vanaerschot, S. Lomov, D. Moens, D. Vandepitte. Variability in composite materials properties // *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 807. P. 23 34
4. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. М : Машиностроение, 1990. 512 с.
5. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. Н. А. Алфутов, П. А. Зиновьев, Б. Г. Попов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.

#### References

1. A. V. Tumanov, V. V. Zelencov, G. A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov : uchebnoe posobie*. [Fundamentals of the layout of the onboard equipment of spacecraft: study guide]. Moscow, MGTU im N. E. Bauman. 2018. 572 p.
2. M. A. Komkov, V. A. Tarasov. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstrukcij raket i sredstv porazheniya : ucheb. Posobie*. [Technology of winding composite structures of missiles and weapons: study guide]. Moscow, MGTU im N. E. Bauman. 2011. 431 p.
3. A. Vanaerschot, S. Lomov, D. Moens, D. Vandepitte. Variability in composite materials properties. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 807. P. 23 34
4. V. V. Vasilyev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin and other. *Kompozicionnye materialy: spravochnik*. [Composite materials: handbook]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1990. 512 p.
5. N. A. Alfutov, P. A. Zinovyev, B. G. Popov. *Raschet mnogoslojnykh plastin i obolochek iz kompozicionnykh materialov*. [Calculation of multilayer plates and shells made of composite materials]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1984. 264 p.



**Секция**

**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ  
ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

УДК 681.586.2, 681.2.084

## **ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УСИЛИЙ В ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

П. П. Бардаев<sup>1</sup>, Т. В. Бурнышева<sup>1\*</sup>, М. Н. Данилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет

Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

<sup>2</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Российская Федерация, 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

E-mail: \*tburn@mail.ru

*Рассмотрены аспекты разработки тензометрической системы контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических систем, включая датчики сил и электронный блок аналого-цифрового преобразования сигналов датчиков.*

*Ключевые слова: тензометрические датчики силы, упругие элементы тензометрических датчиков сил, электронно-преобразующая аппаратура, крупногабаритные трансформируемые космические конструкции.*

## **TENSOMETRIC MEASURING SYSTEM FOR CONTROL OF FORCES IN MOVING ELEMENTS OF LARGE TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES**

P. P. Bardaev<sup>1</sup>, T. V. Burnysheva<sup>1\*</sup>, M. N. Danilov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University

20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)

113, Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation

E-mail: \*tburn@mail.ru

*This paper deals with some aspects of developing a tensometric system for controlling forces in moving elements of large transformable space systems, including force sensors and a data acquisition system that performs analog-to-digital conversion of sensor signals.*

*Keywords: tensometric force sensors, elastic elements of tensometric force sensors, data acquisition systems, large transformable space structures.*

Создание крупногабаритных космических систем [1] сопряжено с рядом проблем [2-3], важнейшей из которых является обеспечение их высокой жесткости при больших габаритных размерах и жестких ограничениях по массе силового каркаса. Как правило, такие конструкции, состоящие из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой элементов, доставляются на космические орбиты в сложенном транспортном состоянии. Последующая процедура раскрытия обеспечивает приведение их в рабочее положение. Именно несущий силовой каркас обеспечивает минимальные габариты в сложенном положении и высокую жесткость конструкции в раскрытом рабочем состоянии.

Одной из важнейших задач в проектировании крупногабаритных трансформируемых космических систем является задача обеспечения надежного их раскрытия и обеспечения дальнейшего корректного функционирования. Наземная отработка разворачивания таких систем не в полной мере подтверждает работоспособность элементов конструкции в условиях невесомости и безвоздушного пространства. Учет всего множества факторов, влияющих на процесс раскрытия конструкции, остается невозможным при их проектировании, не смотря на все достижения в области механики, математиче-

ского и численного моделирования рассматриваемых систем [3]. 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.

Классический метод электротензометрии [4] широко применяется в науке и технике при измерении различных механических величин, в том числе сил и моментов. Тензометрические датчики сил [5-6] являются надежными устройствами, применение которых в конструкциях трансформируемых космических систем позволяет эффективно решить задачу контроля усилий в подвижных элементах.

Целью выполненной научно-исследовательской опытно-конструкторской работы была разработка тензометрической системы контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических систем. Решены две основные задачи:

1) создание серии универсальных тензометрических датчиков сил, характеризующихся малыми габаритами, и возможностью их длительной эксплуатации в неблагоприятных условиях космоса (глубокий вакуум, высокие и низкие температуры, ионизирующее излучение, электромагнитное излучение антенн космического аппарата, переменное магнитное поле Земли и другие факторы);

2) прототипирование компактного электронного блока аналого-цифрового преобразования сигналов первичных измерительных преобразователей (тензометрических датчиков), который может послужить основой для создания цифрового тензодатчика для космических приложений, обеспечивающего выполнение измерений быстроменяющихся величин с минимальной погрешностью.

Выполнено проектирование и изготовлены опытные образцы универсальных компактных тензометрических датчиков сил типа «шайба» (рис. 1), которые предназначены для измерения как статических и квазистатических, так и динамических нагрузок в узлах крупногабаритных раскрывающихся конструкций.



Рис. 1. Тензометрический датчик силы

Габаритные размеры созданного датчика не превышают 31x16x10 мм. При этом максимальное измеряемое усилие составляет 20 тонн, а предельная нагрузка – 35 тонн. Важной задачей, решенной в ходе проектирования, было сохранение структурной целостности и продолжение функционирования узла космического аппарата, включающего датчик, даже после воздействия на датчик критической силы, вызывающей его отказ.

Сигнал тензодатчика (отношение электрического напряжения на выходе моста Уитстона к напряжению его питания) остается постоянным при действии длительных нагрузок (месяцы, годы) постоянной величины, что обусловлено высоким сопротивлением ползучести материалов упругого элемента и материалов современных тензорезисторов. Тензометрические датчики характеризуются высокой степенью линейности, повторяемостью результата измерения при многократных циклах нагружения и разгрузки. Гистерезис пренебрежимо мал за счет того, что упругий элемент изготовлен из прецизионного сплава, характеризующегося высоким значением предела упругости  $\sigma_{0,002}$ , а также использования особого режима термообработки упругого элемента, и современной технологии наклейки тензорезисторов. Тензометрические датчики имеют низкий импеданс (750 Ом) и высокую чувствительность (более 0,45 мВ/т при напряжении питания 5 В и максимальной измеряемой нагрузке 20 тонн), что позволяет выполнять преобразование электрического напряжения на выходе моста Уитстона в цифровой сигнал и при этом обеспечить низкий уровень шумовой составляющей в сигнале.

Наиболее важным и основным узлом программно-аппаратного комплекса контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических систем является блок аналого-цифрового преобразования сигналов первичных измерительных преобразователей [7-8], выполняющий предварительную обработку аналогового сигнала датчиков – усиление слабых аналоговых сигналов, фильтрацию зашумленных сигналов и преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал. Кроме того, блок имеет генератор сигнала возбуждения тензодатчика. На рис. 2 представлен внешний вид полностью функционального прототипа блока.



Рис. 2. Блок аналого-цифрового преобразования сигналов первичных измерительных преобразователей

В рамках работы решен ряд задач, среди которых важнейшей является обоснование выбора современной элементной компонентной базы для построения тракта предварительной обработки сигнала и выработка рационального схмотехнического решения. Аналоговая электроника выполнена на прецизионных малошумящих операционных усилителях (в том числе использованы инструментальные усилители). Реализован активный фильтр низких частот – четырехзвенный фильтр Бесселя 8-го порядка. Топология звена: второй порядок с многопетлевой отрицательной обратной связью (схема Рауха). Благодаря постоянной задержке на всех частотах до частоты среза, данный линейно-фазовый фильтр позволяет удалить внеполосные шумы, не затрагивая фазовые соотношения компонентов многочастотного полезного сигнала. Высокая скорость отклика данного фильтра на скачок напряжения и отсутствие выбросов и звона на переходной характеристике позволяют выполнять антиалайзинговую фильтрацию на входе аналого-цифрового преобразователя. Аналого-цифровой преобразователь представлен многоканальной интегральной схемой, реализующей принцип сигма-дельта модуляции, с разрядностью 32 бита и частотой дискретизации 38 тысяч преобразований в секунду. Реализована «шести проводная» схема питания тензодатчика, построенная на основе компенсационного стабилизатора напряжения, являющегося генератором сигнала возбуждения тензодатчика.

Проведены испытания созданных устройств и подтверждено соответствие их технических характеристик проектным значениям.

#### Библиографические ссылки

1. Лопатин А. В., Рутковская А. М. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 51–57.
2. Зимин В. Н., Бойков В. Г., Файзуллин Ф. Р. Расчет раскрытия крупногабаритной космической конструкции ферменного типа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции и материалы для перспективных ракетно-космических систем. 2012. С. 5–15.
3. Крылов А. В. Исследование процесса раскрытия антенного контура // Изв. высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 12 (657). С. 45–50.
4. Бауманн Э. Измерение сил электрическими методами. М. : Мир, 1978. 430 с.
5. Белотелов В. П., Жибарева И. Н., Герасимов Е. И. Упругие чувствительные элементы датчиков в авиационной и космической технике // Датчики и системы. 2001. № 7. С. 16–18.

6. Шамраков А. Л., Тимофеев В. А. Силоизмерительные датчики для ракетно-космической техники. Перспективы развития // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 11–13.
7. Ким В. Л., Андреев С. А. Синхронный усилитель с встроенным квадратурным генератором // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 197.
8. Yao H., Cao H., Li J. Design and Implementation of a Portable Wireless System for Structural Health Monitoring // Measurement and Control. 2016. V. 49 (1), pp. 23–32.

### References

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya A. M. [Review of structures of modern transformable space antennas]. Vestnik SibGAU. 2007, no. 2, p. 51–57. (In Russ.)
2. Zimin V. N., Boikov V. G., Faizullin F. R. Raschet raskrytiia krupnogabaritnoi kosmicheskoi konstruktсии fermennogo tipa [The calculation of the disclosure of large space truss-type structure]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Spetsial'nyi vypusk Krupnogabaritnye transformiruemye kosmicheskie konstruktсии i materialy dlia perspektivnykh raketno-kosmicheskikh sistem [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering. Special issue on Large transformable space structures and materials for advanced rocket and space systems]. 2012, p. 5–15.
3. Krylov A. V. [Investigation of the antenna deployment behavior]. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2013, no.12 (657), p. 45–50. (In Russ.)
4. Baumann E. Ismerenie sil elektricheskimi metodami [Measurement of Forces by Electrical Methods]. Moscow, Mir Publ., 1978, 430 p. (In Russ.)
5. Belotelov V. P., Zhibareva I. N., Gerasimov E. I. [Elastic sensitive elements of sensors in aviation and space technology]. Sensors and Systems. 2001. no. 7, p. 16–18. (In Russ.)
6. Shamrakov A. L., Timofeev V. A. [Force-measuring sensors for rocket and space technology. Development prospects]. Sensors and systems. 2005. no. 9, p. 11–13. (In Russ.)
7. Kim V. L., Andreev S. A. [Synchronous amplifier with built-in quadrature generator]. Modern problems of science and education. 2014. no. 5, p. 197. (In Russ.)
8. Yao H., Cao H., Li J. Design and Implementation of a Portable Wireless System for Structural Health Monitoring // Measurement and Control. 2016. no. 49 (1), p. 23–32.

© Бардаев П. П., Бурнышева Т. В., Данилов М. Н., 2022

УДК 687

## СОЗДАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ФЕРМ, РАЗВОРАЧИВАЕМЫХ В КОСМОСЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

<sup>1</sup>О. А. Белов, <sup>2</sup>А. П. Белоглазов, <sup>3</sup>А. Г. Еремин, <sup>3</sup>А. В. Верстаков

<sup>1</sup> ООО «Би Питрон ОП»  
Российская Федерация, 199106, г. Санкт-Петербург, Шкиперский проток, д. 14, корп. 19  
<sup>2</sup> ООО «Ниагара»  
Российская Федерация, 119049, г. Москва, ул. Донская, д.6/2  
<sup>3</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: niagara-mos@inbox.ru

*Рассмотрена возможность использования в качестве трансформируемой системы фермы, формируемой из первоначально гибких элементов, компактно свернутых в стартовом положении космического аппарата, а затем при раскручивании и соединении образующую в орбитальном положении жесткую конструкцию.*

*Ключевые слова: трансформируемая система, ферма, космический аппарат, гибкий рукав, ультразвуковая сварка, жесткостные характеристики, собственная частота колебаний*

## CREATION OF LARGE-SIZED FARMS DEPLOYED IN SPACE FROM TRANSFORMABLE CARBON FIBER ELEMENTS

<sup>1</sup>O. A. Belov, <sup>2</sup>A. P. Beloglazov, <sup>3</sup>A. G. Eremin, <sup>3</sup>A. V. Verstakov

<sup>1</sup> LLC "Bi Pitron OP"  
14, building 19, Skipper's bayou, St. Petersburg, 199106, Russian Federation  
<sup>2</sup> LLC "Niagara"  
6/2, Donskaya Str., 119049, Moscow, Russian Federation  
<sup>3</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4, Volokolamsk highway, Moscow, 125993, Russian Federation  
E-mail: niagara-mos@inbox.ru

*The possibility of using a truss formed from initially flexible elements compactly folded in the launch position of the spacecraft, and then forming a rigid structure in the orbital position during unwinding and connection, is considered as a transformable system.*

*keywords: transformable system, truss, spacecraft, flexible sleeve, ultrasonic welding, stiffness characteristics, natural oscillation frequency*

Усложнение задач, возлагаемых на космические аппараты (КА), вызывают необходимость разработки конструкций, ранее не применявшихся в космической технике. Среди них организация трансформируемых систем в виде различных ферм, способных в стартовом положении прибывать в компактном, сложенном состоянии и затем после вывода на орбиту КА выдвигаться на заданное расстояние. В настоящее время разработано ряд таких конструкций, функционирование которых основано или на раздвижении сложенных жестких элементов, либо на раскладывании сложенных балок, либо на телескопическом принципе с последующей фиксацией в развернутом виде. Все эти системы характеризуются достаточно большими габаритами в стартовом положении и соответственно массой.

Предлагаемая к рассмотрению система трансформирования основана на формировании фермы из первоначально гибких элементов, которые в стартовом положении КА могут быть компактно свернуты, а затем при раскручивании и соединении образовывать жесткую конструкцию. В качестве гибко-

го формирующего ферму элемента выбран рукав из сваренных ультразвуком по кромкам углепластиковых лент выполненный на основе термопластичного связующего, например, полиэфирэфиркетона. Ферма образуется из трех рукавов, сматываемых с трех барабанов, размещенных на принадлежащем КА основании по сторонам равностороннего треугольника. Рукава при разматывании образуют в сечении чечевицеобразную форму с плоскими по краям кромками (рис. 1).

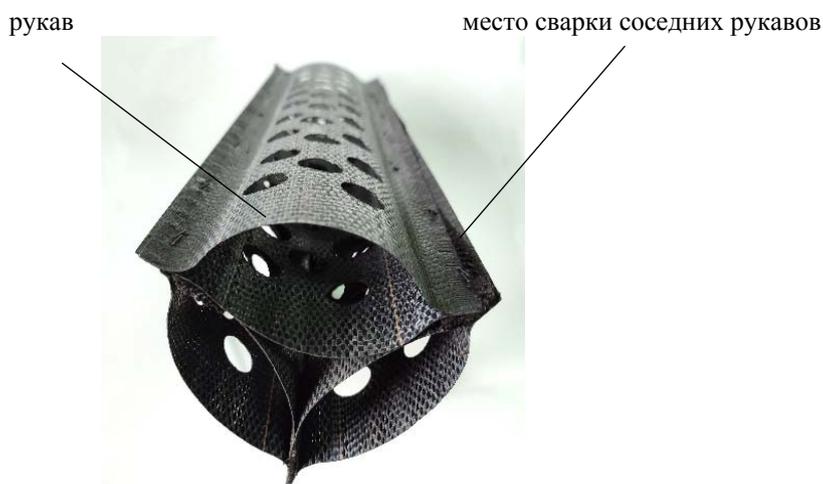


Рис. 1. Поперечный профиль фермы

Крепление рукавов между собой обеспечивается также ультразвуковой сваркой, выполняемой роликами, через которые проходят плоские кромки соседних рукавов. В результате формируется ферма из углепластиковых рукавов с сечением представляющем треугольник из трех чечевицеобразных профилей, которая способна в орбитальном положении КА отодвинуть от него площадку с размещенным на ней оборудованием. Сама площадка закреплена на торце соединенных в единую конструкцию рукавов. Масса фермы с сечением стороны треугольника ~ 1 м и толщиной ленты рукава 1 мм в зависимости от конструкции приведена в таблице.

**Собственные частоты системы трансформирования, Гц**

Вариант	Масса конструкции, кг	№ формы колебаний				
		1	2	3	4	5
1 Сплошной	296	0.886	0.886	2.251	2.839	2.839
2.1 С круглой перфорацией, диаметр отверстий 24 см	270	0.787	0.788	2.540	3.000	3.086
2.2 С круглой перфорацией, диаметр отверстий 40 см	224	0.625	0.628	2.562	2.629	2.672
3 С треугольной перфорацией	231	0.701	0.702	2.603	2.837	2.870

Расчет жесткостных и прочностных характеристик полученной конструкции проводился в программном комплексе ANSYS. Были рассмотрены различные варианты конструкции: сплошная, с круглой перфорацией, с треугольной перфорацией. Для каждого варианта получены собственные частоты и соответствующие им формы. Были приняты следующие параметры конструкции: длина 25 м, отодвигаемая присоединенная масса 100 кг. Результаты расчетов приведены в таблице.

Следует отметить, что в настоящее время существует технология изготовления ультразвуковой сварки углепластиковых лент в рукава и соответствующее оборудование. Изготовлена серия рукавов поперечным размером около 120 мм /1/.

На базе разворачивающихся рукавов из свариваемых ультразвуковой сваркой углепластиковых лент на основе термопластичного связующего, например, полиэфирэфиркетона возможно построение

другой конструкции трансформируемой фермы. Она состоит из продольных разворачивающихся рукавов и наматываемых на них диагональных ребер, которые также ультразвуковой сваркой привариваются к образующимся продольным рукавам. Сами ребра выполнены также из углепластиковых лент и намотаны на барабаны. В предлагаемой конструкции на некотором основании КА размещаются барабаны с намотанными на них рукавами, а по периферии основания механизмы размотки и приварки к продольным рукавам диагональных ребер (рис. 2).

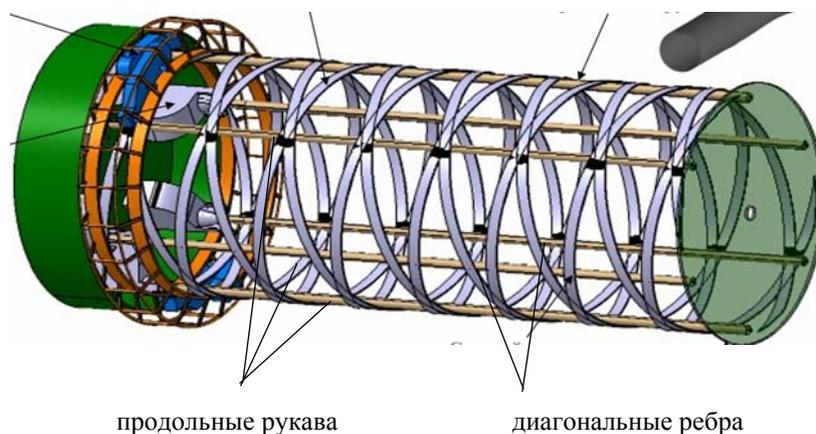


Рис. 2. Трансформируемая ферма с диагональными ребрами

Таким образом на основе разворачивающихся рукавов, выполненных из углепластиковых лент на основе термопластичного связующего, возможно создание легких трансформируемых конструкций, например, различных мачт и ферм для КА. Они могут также служить приводными устройствами для других трансформируемых конструкций, например, таких, как система типа «кузнечик».

#### Библиографическая ссылка

1. Напряженно-деформируемое состояние ленточного штыря в транспортировочном положении / И. В. Кудрявцев, О. Б. Гоцелюк // Сборник Международной конференции «Решетневские чтения» 2018 год, т.1, 135с.

#### Reference

1. The stress-strain state of the belt pin in the transport position / I. V. Kudryavtsev, O. B. Gotselyuk // Collection of the International Conference "Reshetnev readings" 2018, vol.1, 135с.

Белов О. А., Белоглазов А. П., Еремин А. Г., Верстаков А. В., 2022

УДК 629.7.018:531.391

## К ВОПРОСУ КОРРЕКЦИИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. А. Бернс<sup>1</sup>, А. И. Годин<sup>2</sup>, Е. П. Жуков<sup>1</sup>, Д. А. Красноруцкий<sup>1</sup>,  
П. А. Лакиза<sup>1</sup>, Е. А. Лысенко<sup>3</sup>, А. В. Пара<sup>2</sup>, А. В. Шкода<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина  
Российская Федерация, 630051, Новосибирск, ул. Ползунова, 21

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная корпорация»  
Российская Федерация, 115054, Москва, ул. Б. Пионерская, 1

<sup>3</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
E-mail: qinterfly@gmail.com

*Оценивается работоспособность предлагаемого метода коррекции на примере расчетной модели отъемной части крыла летательного аппарата. Целью коррекции является изменение спектра частот собственных колебаний.*

*Ключевые слова: конечно-элементная модель, собственные колебания, обобщенные модальные характеристики, коррекция матрицы жесткости, модальный анализ.*

## FINITE ELEMENT MODEL UPDATING OF AIRCRAFT

V. A. Berns<sup>1</sup>, A. I. Godin<sup>2</sup>, E. P. Zhukov<sup>1</sup>, D. A. Krasnorutskiy<sup>1</sup>,  
P. A. Lakiza<sup>1</sup>, E. A. Lysenko<sup>3</sup>, A. V. Para<sup>2</sup>, A. V. Shkoda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Aeronautical Research Institute Named After S.A. Chaplygin  
21, Polzunov Str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation

<sup>2</sup>United Aircraft Corporation

1, Bolshaya Pionerskaya, Moscow, 115054, Russian Federation

<sup>3</sup>Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: qinterfly@gmail.com

*We evaluate efficiency of the proposed method for finite element model updating using the example of a numerical model of an airplane wing. The purpose of updating is to change eigenspectrum.*

*Keywords: finite element model, natural oscillations, modal characteristics, stiffness matrix updating, modal analysis.*

Точность исходных данных, используемых для создания расчетных моделей летательных аппаратов, зависит от погрешности измерения геометрических и механических свойств, принимаемых допущений и упрощений метода конечных элементов (КЭ). Для повышения достоверности воспроизводимых моделью процессов используется верификация по экспериментальным данным модальных испытаний.

Обычно варьируемыми параметрами коррекции при верификации выступают механические характеристики материалов и геометрические размеры. Такая концепция требует введения естественных ограничений на изменяемые параметры для сохранения физической и геометрической согласованности модели с реальной конструкцией. Кроме того, на каждом шаге итерационного процесса минимизации целевой функции, описывающей отклонение расчетных характеристик от экспериментальных, необходимо полное перестроение модели – ассемблирование матриц жесткости и масс, что является вычислительно затратным.

Предлагается метод, который не требует перестроения исходной модели в ходе итерационного процесса, поскольку коррекция динамических свойств происходит за счет добавления специальных невесомых балочных элементов, параметры которых подлежат определению [1]. Целью коррекции является изменение спектра частот собственных колебаний за счет изменения матрицы жесткости. При этом матрица масс считается определенной точно и в ходе коррекции не изменяется. Целевая функция представляет собой сумму квадратов отклонений расчетных и экспериментальных частот собственных колебаний.

Разработанная программная реализация предложенного метода коррекции была апробирована на примере динамически подобной модели самолета Ту-204 [1] и имитационной модели каркаса зонтичной антенны космического аппарата [2].

Целью данной работы является оценка работоспособности предлагаемого метода коррекции (метод 1) на примере расчетной модели отъемной части крыла (ОЧК) летательного аппарата. Получаемые результаты сравниваются с одним из широко используемых методов коррекции: методом варьирования геометрических и механических характеристик КЭ-модели (метод 2).

Коррекция проводилась по пяти экспериментально определенным частотам собственных колебаний. Расчет целевой функции по методу 2 производился с помощью скриптов Ansys Mechanical APDL в параллельном режиме на нескольких GRPC-серверах. Метод 1 реализован в собственном программном комплексе. Результаты коррекции сведены в таблицу. При этом все частоты приведены к частоте первого тона, определенной экспериментально.

### Результат коррекции ОЧК

Тон	Приведенная частота		Погрешность, %		
	Эксперимент	Исходная модель	До коррекции	Метод 1	Метод 2
1	1.00	1.51	50.7	0.0	0.7
2	2.28	3.18	39.5	0.0	0.2
3	3.37	4.13	22.6	0.0	-0.6
4	3.95	4.82	21.8	0.0	-0.2
5	4.87	6.15	26.2	0.0	0.5

Таблицы соответствия форм колебаний по МАС-критерию [3] до и после коррекции по методам 1 и 2 приведены на рисунке.

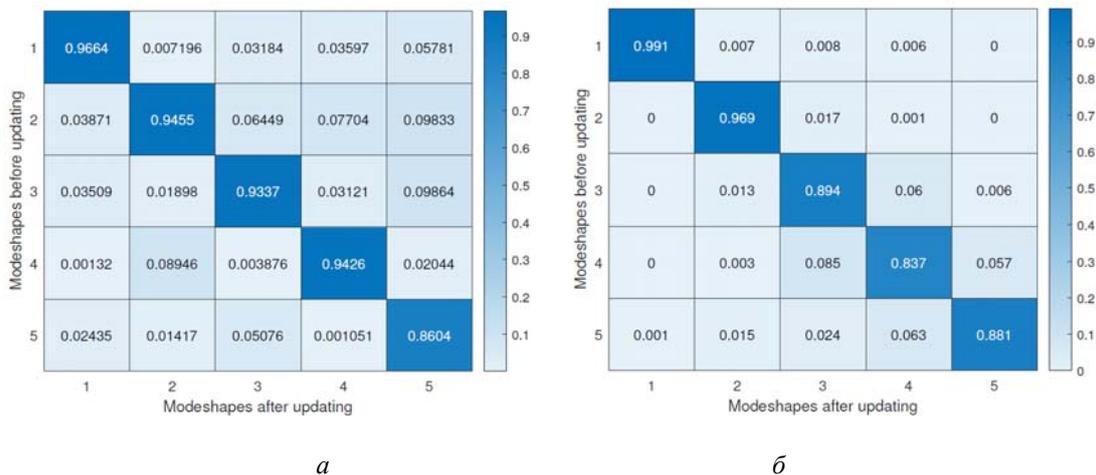


Рис. 1. Таблицы соответствия форм колебаний до и после коррекции:  
а – метод 1, б – метод 2

В отличие от метода 1, который позволяет сохранить физическую согласованность форм в ходе коррекции, применение метода 2 привело к их значительному искажению. Поэтому в целевую функцию было введено штрафное слагаемое за отклонение от исходных форм колебаний по МАС-критерию, а на изменения механических и геометрических характеристик накладывались линейные ограничения.

Таким образом, была осуществлена одновременная коррекция расчетной модели ОЧК по пяти тонам колебаний. Было выяснено, что на данном примере метод 1 быстрее и точнее метода 2. Необходимо отметить, что в данной работе не учитывались экспериментальные погрешности определения динамических характеристик [4–5]. Это является предметом дальнейших исследований.

### Библиографические ссылки

1. Метод коррекции конечно-элементных моделей динамических систем / Д.А. Красноруцкий, Лакиза П.А., Бернс В.А., Жуков Е.П. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2021. № 3. С. 84–95. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.08.
2. Разработка расчетно-экспериментального метода модального анализа крупногабаритных трансформируемых космических конструкций / В. А. Бернс, Левин В. Е., Красноруцкий Д.А., Маринин Д.А., Жуков Е.П., Маленкова В.В., Лакиза П.А. // *Космические аппараты и технологии*. 2018. Т. 2, № 3. С. 125-133.
3. Allemang R.J. The Modal Assurance Criterion Twenty Years of Use and Abuse // *Journal of Sound and Vibration*, 2003. Vol. 37. P. 14–23.
4. Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов / В.А. Бернс, Долгополов А.В., Жуков Е.П. и др. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. 160 с.
5. Application of ground vibration testing in small manned or unmanned aircraft prototyping / A. Olejnik, Kachel S., Rogolski R. and etc. // *Proc IMechE Part G : J Aerospace Engineering*, 2021. Vol. 235. P. 54–69.

### References

1. Krasnorutskiy D.A., Lakiza P.A., Berns V.A., Zhukov E.P. *Metod korrektsii konechno-elementnykh modeley dinamicheskikh sistem* [Finite Element Model Updating Method of Dynamic Systems]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2021, no. 3, p. 84–95.
2. Berns V.A., Levin V.E., Krasnorutskiy D.A., Marinin D.A., Zhukov E.P., Malenkova V.V., Lakiza P.A. *Razrabotka raschetno-eksperimental'nogo metoda modal'nogo analiza krupnogabaritnykh transformiruyemykh kosmicheskikh konstruksiy* [Development of a Calculation and Experimental Method for Modal Analysis of Large Transformable Space Structures]. *Spacecrafts and Technologies*. 2018. no. 2, vol. 3, p. 125–133.
3. Allemang R.J. The Modal Assurance Criterion Twenty Years of Use and Abuse. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, vol. 37, p. 14–23.
4. Berns V.A., Dolgoplov A.V., Zhukov E.P., Lushin V.N., Marinin D.A. *Eksperimental'nyy modal'nyy analiz letatel'nykh apparatov* [Ground Vibration Testing of Aircraft]. Novosibirsk, Nstu Publ., 2017, 160 p.
5. Olejnik A., Kachel S., Rogolski R., Szczesniak M. Application of ground vibration testing in small manned or unmanned aircraft prototyping. *Proc IMechE Part G : J Aerospace Engineering*. 2021, vol. 235, p. 54–69.

© Бернс В. А., Годин А. И., Жуков Е. П., Красноруцкий Д. А.,  
Лакиза П. А., Лысенко Е. А., Пара А. В., Шкода А. В., 2022

УДК 629.7.018:531.391

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

В. А. Бернс<sup>1</sup>, А. И. Годин<sup>2</sup>, Е. П. Жуков<sup>1</sup>, Д. А. Красноруцкий<sup>1</sup>,  
П. А. Лакиза<sup>1</sup>, Д. А. Маринин<sup>3</sup>, А. В. Пара<sup>2</sup>, А. В. Шкода<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина  
Российская Федерация, 630051, Новосибирск, ул. Ползунова, 21

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная корпорация»  
Российская Федерация, 115054, Москва, ул. Б. Пионерская, 1

<sup>3</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
E-mail: qinterfly@gmail.com

*Рассматривается применение операционного модального анализа для определения модальных параметров аэрокосмических конструкций: самолета и рефлектора зонтичной антенны космического аппарата.*

*Ключевые слова: летательный аппарат, операционный модальный анализ, собственные колебания, модальные параметры.*

**APPLICATION OF OPERATIONAL MODAL ANALYSIS IN ESTIMATION  
OF MODAL PARAMETERS FOR AEROSPACE VEHICLES**

V. A. Berns<sup>1</sup>, A. I. Godin<sup>2</sup>, E. P. Zhukov<sup>1</sup>, D. A. Krasnorutskiy<sup>1</sup>,  
P. A. Lakiza<sup>1</sup>, D. A. Marinin<sup>3</sup>, A. V. Para<sup>2</sup>, A. V. Shkoda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Aeronautical Research Institute Named After S. A. Chaplygin  
21, Polzunov Str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation

<sup>2</sup>United Aircraft Corporation

1, Bolshaya Pionerskaya, Moscow, 115054, Russian Federation

<sup>3</sup>Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: qinterfly@gmail.com

*We apply operational modal analysis to estimate modal parameters of aeronautical vehicles, such as an airplane and antenna reflector of a spacecraft structure.*

*Keywords: aerospace vehicle, operational modal analysis, natural oscillations, modal characteristics.*

С целью обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) необходимо верифицировать расчетные модели, описывающие динамическое поведение исследуемых конструкций. Такие модели используются для оценки эксплуатационной нагруженности, обеспечения прочности, аэроупругой устойчивости и управляемости ЛА. Исходными данными при верификации выступают модальные параметры: характеристики демпфирования, частоты и формы собственных колебаний, которые определяются посредством модального анализа. Основным методом проведения наземных модальных испытаний ЛА является экспериментальный модальный анализ (ЭМА), в ходе которого измеряются отклик конструкции на известное многоточечное возбуждение [1]. Однако определение модальных параметров методами ЭМА оказывается невозможным при нагружении конструкции неизвестным случайным воздействием в ходе эксплуатации, например, при выполнении полетов ЛА. В этом случае используются методы операционного модального анализа (ОМА), кото-

рые основываются на предположении, что возбуждение близко к стационарному белому шуму [2]. Недостатками таких методов в сравнении с ЭМА являются невозможность регулирования уровней возбуждения, относительно высокая вычислительная сложность и необходимость проведения много-ступенчатого анализа с целью исключения модальных параметров, которые не присущи конструкции и являются характеристиками возбуждения или расчетного метода.

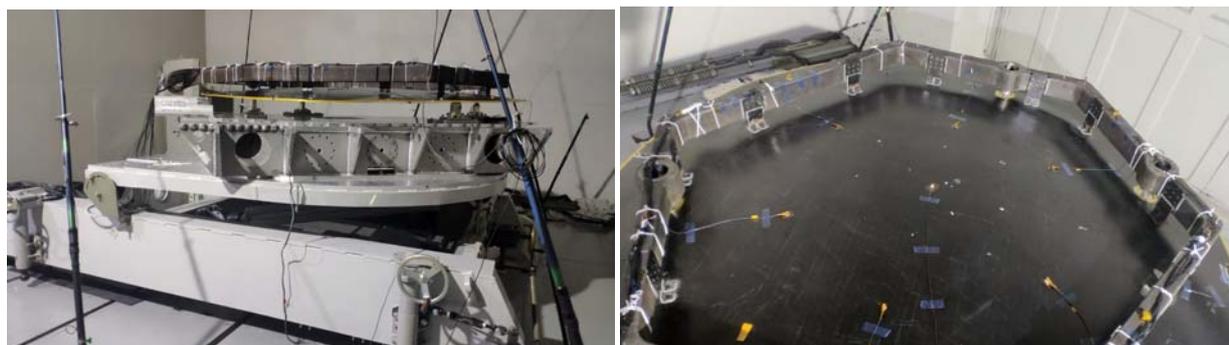
Целью данной работы является применение наиболее распространённых методов ОМА для определения модальных параметров самолета и рефлектора зонтичной антенны космического аппарата (КА).

Методы ОМА разделяются на две категории: частотные и временные методы [3]. При проведении анализа во временной области импульсные характеристики аппроксимируются как корреляционные функции. Основной недостаток таких методов – импульсная характеристика с отдельно взятого датчика является суперпозицией колебаний по всем тонам совместно, а значит, проблема идентификации является полноранговой. Методы анализа в частотной области основываются на предположении о том, что спектральное разложение процесса происходит по частотам собственных колебаний конструкций [4].

В данной работе используются методы анализа во временной области, позволяющие получать несмещенную оценку модальных параметров: методы идентификации стохастической модели в пространстве состояний (SSI). Существует две разновидности этого подхода: на основе ковариационной (корреляционной) матрицы (SSI-COV) и на основе построения проекций исходных сигналов (SSI-DD). Как показано в работе [5], эти подходы являются тесно связанными. Однако, метод SSI-COV основывается на более простых предположениях и позволяет быстрее обрабатывать данные откликов, тогда как SSI-DD допускает проведение расширенной постобработки получаемых результатов, например, оценку вклада каждого тона колебаний.

Для каждого из методов была составлена программная реализация, которая тестировалась на примерах упруго-массовой системы с демпферами и консольной балки под воздействием случайного возбуждения. Кроме того, тестирование методов осуществлялось на расчетном примере имитационной модели самолета при приложении симметричной коротко-импульсной нагрузки к законцовкам крыла. Во всех рассматриваемых примерах для расчета использовались только данные откликов конструкций. Полученные частоты, формы и декременты колебаний, оказались близки к соответствующим расчетным значениям.

В дальнейшем рассматриваемые методы операционного модального анализа были применены для определения модальных характеристик рефлектора зонтичной антенны КА (см. рисунок), подвергнутого шумовому воздействию в акустической камере.



Рефлектор зонтичной антенны КА в акустической камере

Частоты и формы собственных колебаний, полученные в результате анализа, были сопоставлены с расчетными. Определенные значения логарифмических декрементов колебаний оказались низкими ( $0,03 \pm 0,06$ ), что обусловлено цельнокомпонитной структурой рефлектора. Исследована сходимость модальных параметров при варьировании длительности временного сегмента на котором анализировались данные откликов.

Кроме того, методы использовались для определения модальных параметров самолета при полете на разных скоростных режимах. Полученные результаты представлялись в виде графических зависимостей логарифмического декремента колебаний от скорости полета с целью определения критической скорости флаттера. Необходимо отметить, что в ходе проведения операционного модального

анализа производилось множественное осреднение результатов, соответствующих одному скоростному режиму. При этом не определялись доверительные интервалы для средних значений модальных параметров. Это является предметом дальнейших исследований.

### Библиографические ссылки

1. Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов на основе монофазных колебаний / В.А. Бернс, Жуков Е.П., Маринин Д.А., Маленкова В.В. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2018. № 4. С. 43–54.
2. Brincker R., Ventura C. Introduction to Operational Modal Analysis // *John Wiley and Sons*, 2015. P. 372.
3. Magalhaes F., Cuhna A. Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011. No. 25. P. 1431–1450.
4. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator / P. Guillaume, Verboven P., Vanlanduit S., Auweraer M.V., Peeters B. // *Proceedings of IMAC*, 2003. P. 183–192.
5. Peeters B. System identification and damage detection in civil engineering : Ph.D. thesis. Leuven : Katholieke Universiteit, 2000. P. 257.

### References

1. Berns V.A., Zhukov E.P., Marinin D.A., Malenkova V.V. *Eksperimental'nyy modal'nyy analiz letatel'nykh apparatov na osnove monofaznykh kolebaniy* [Experimental Modal Analysis of Aircraft on the basis of Monophasic Vibrations]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018, no. 4, p. 43–54.
2. Brincker R., Ventura C. Introduction to Operational Modal Analysis. *John Wiley and Sons*, 2015, 372 p.
3. Magalhaes F., Cuhna A. Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, no. 25, p. 1431–1450.
4. Guillaume P., Verboven P., Vanlanduit S., Auweraer M.V., Peeters B. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator. *Proceedings of IMAC*, 2003, p. 183–192.
5. Peeters B. System identification and damage detection in civil engineering. Ph.D. thesis. Leuven, Katholieke Universiteit, 2000, 257 p.

© Бернс В. А., Годин А. И., Жуков Е. П., Красноручский Д. А.,  
Лакиза П. А., Маринин Д. А., Пара А. В., Шкода А. В., 2022

УДК 536.248; 624.1

**МЕТОД ЗАЩИТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНЫХ ШИРОТ ОТ ПРОСАДКИ ГРУНТА  
НА ОСНОВЕ ТЕРМОСИФОНОВ**

Г. В. Двирный<sup>1,2,5</sup>, В. В. Двирный<sup>1,2,3,5</sup>, А. А. Шевчук<sup>2,3\*</sup>, М. В. Елфимова<sup>4</sup>, А. А. Снежко<sup>5</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. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, ул. Ленина, 52

<sup>4</sup>Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России

Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22

<sup>5</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

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

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

*Предложен метод защиты технических объектов большой площади, эксплуатируемых в условиях вечной мерзлоты, от просадки грунта. Снижение среднегодовой температуры вечной мерзлоты под объектом достигается использованием термосифонов специальной конструкции.*

*Ключевые слова: вечная мерзлота, термостабилизация грунта, термосифон.*

**A METHOD FOR PROTECTING TECHNICAL OBJECTS  
IN CONDITIONS OF NORTHERN LATITUDES FROM SOIL SUBSIDENCE  
BASED ON THERMOSYPHONS**

G. V. Dvirniy<sup>1,2,5</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1,2,3,5</sup>, A. A. Shevchuk<sup>2,3</sup>, M. V. Yelfimova<sup>4</sup>, A. A. Snezhko<sup>5</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>Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia

22, Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

<sup>5</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: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

*We have proposed a method for protecting large area technical objects operated in permafrost conditions from soil subsidence. The decrease in the average annual temperature of the permafrost under the object is achieved by using specially designed thermosyphons.*

*Keywords: permafrost, soil thermal stabilization, thermosyphon.*

Происходящее изменение климата в результате глобального потепления приводит к деградации вечной мерзлоты. Это крайне негативно влияет на несущую способность грунта и, как следствие, на устойчивость и безопасность эксплуатируемых в ее условиях технических объектов. Так, только по данным 2002 г., 21% происходящих ежегодно в Западной Сибири аварий на нефте- и газопроводах

было вызвано механическими воздействиями и деформациями из-за неравномерной осадки грунта при таянии вечной мерзлоты или выдавливания опор и фундаментов при промерзании, а расходы на поддержание работоспособности трубопроводов и ликвидацию их деформаций, связанных с изменениями вечной мерзлоты, ежегодно составляли до 55 млрд. рублей [1].

Наиболее крупной катастрофой в истории заполярной Арктики по масштабу ущерба для окружающей среды стала массивная утечка 29 мая 2020 года возле Норильска более 20 тыс. тонн дизельного топлива. Основной причиной катастрофы, объявленной чрезвычайной ситуацией федерального масштаба, названо внезапное проседание на вечной мерзлоте свай фундамента емкости [2].

Существует множество решений по термостабилизации грунта на основе простых и эффективных устройств – термосифонов в виде замкнутой с обоих концов трубы, внутри которой находится хладагент. Нижний конец термосифона заглубляют в верхний слой вечной мерзлоты под защищаемым объектом, снабженный радиатором верхний конец находится в окружающем воздухе. Разницы температур достаточно для испарения хладагента, при этом за счет затрат тепла на испарение происходит понижение температуры нижнего конца термосифона. Работая таким образом по испарительно-конденсационному принципу, термосифон отводит тепло с перепадом  $1 - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  из верхнего слоя вечной мерзлоты в атмосферный воздух, понижая ее среднегодовую температуру [3 – 5].

Термосифоны заглубляют в грунт вертикально или под небольшим углом к вертикали, что позволяет успешно термостабилизировать грунт под точечными (например, опоры ЛЭП, [3]) или линейно протяженными объектами (дороги, трубопроводы). Однако для защиты объектов со значительными размерами основания такой метод непригоден.

В соответствии с предложенным авторами методом, термосифон специальной конструкции состоит из конденсационного участка, расположенного вертикально в окружающем воздухе, и испарительного участка, заглубленного под определенным углом к горизонтали под защищаемым объектом. Пример защиты технического объекта больших размеров с использованием таких термосифонов показан на рис. 1, 2.

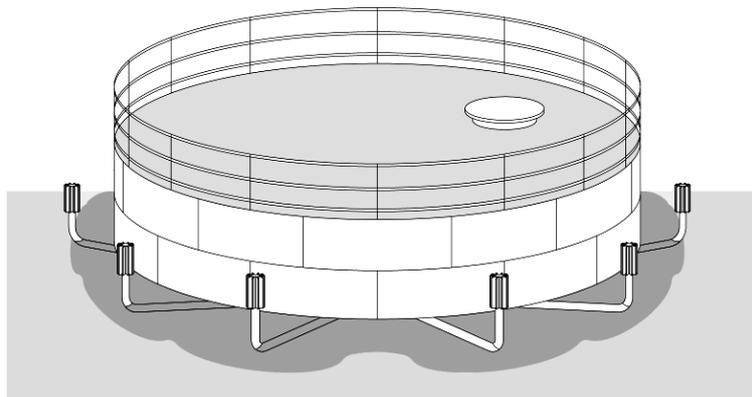


Рис. 1. Термостабилизация грунта под резервуаром для хранения нефтепродуктов

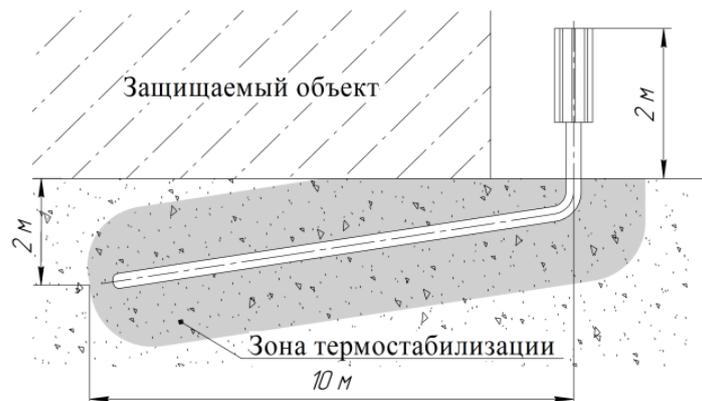


Рис. 2. Модель термосифона с длиной испарительного участка 10 м

Результаты расчетов и моделирования показывают, что при оптимальном сочетании параметров длина испарительного участка под основанием объекта может достигать до 10 м по горизонтали (рис. 2), а линейные размеры или диаметр защищаемого объекта – до 20 м.

### Библиографические ссылки

1. Анисимов О. А., Белолуцкая М. А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России. // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 15-22.
2. Норникель. Ликвидация последствий аварии на резервуаре хранения дизельного топлива ТЭЦ-3. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nornickel.ru/files/ru/others/liquidation\\_chpp-3.pdf](https://www.nornickel.ru/files/ru/others/liquidation_chpp-3.pdf) (дата обращения: 09.09.2022).
3. Хасанов Т. А., Залогина Ю. А. Сезонно-действующие охлаждающие устройства как решение проблемы морозного пучения фундаментов опор высоковольтных линий в районе Крайнего Севера // Инновационное развитие. 2018. № 5(22). С. 51-52.
4. Пат. 2256746 Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> E02D 3/115. Способ охлаждения грунта и тепловая свая для его охлаждения / Г.И. Овечкин, В.В. Двирный, А.В. Леканов [и др.]: № 2003127860/03 ; заявл. 15.09.2003 ; опубл. 20.07.2005, Бюлл. № 20. 8 с.
5. Пат. 2382972 Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> F28D 15/02, E02D 3/115. Тепловая труба / Н.А. Тестоедов, В.В. Двирный, С.П. Ермилов [и др.]: № 2008151006/06 ; заявл. 22.12.2008 ; опубл. 27.02.2010, Бюлл. № 6. 7 с.

### References

1. Anisimov O. A., Belolutskaia M. A. *Otsenka vliyaniya izmeneniya klimata i degradatsii vechnoy merzloty na infrastrukturu v severnykh regionakh Rossii* [Assessment of the impact of climate change and permafrost degradation on infrastructure in the northern regions of Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2002, no. 6, p. 15-22.
2. Nornickel. [Elimination of the consequences of the accident at the diesel fuel storage tank of the combined heat and power plant 3]. URL: [https://www.nornickel.ru/files/ru/others/liquidation\\_chpp-3.pdf](https://www.nornickel.ru/files/ru/others/liquidation_chpp-3.pdf) (accessed: 09.09.2022).
3. Khasanov T. A., Zalogina Ju. A. *Sezonno-deystvuyushchiye okhlazhdayushchiye ustroystva kak resheniye problemy moroznogo pucheniya fundamentov opor vysokovol'tnykh liniy v rayone Kraynego Severa* [A seasonal-operating cooling devices as a solution of the problem of freezer leading of foundations of support of high-voltage lines in the area of the far north]. *Innovatsionnoye razvitiye*. 2018, no 5(22), p. 51-52.
4. Ovechkin G. I., Dvirnyj V. V., Lekanov A. V., Khalimanovich V. I., Tomchuk A. V., Kozlov A. G., Kesel'man G. D., Sheverdov V. F., Sinichenko M. I., Chikarov N. F., Ermilov S. P., Khristich V. V., Smirnykh V. N., Chernjavskij S. A., Derevjanko V. A. *Sposob okhlazhdeniya grunta i teplovaya svaya dlya yego okhlazhdeniya* [Method for ground cooling and heat-conduction pile for ground cooling]. Patent RF, no. 2256746, 2003.
5. Testoyedov N. A., Dvirnyy V. V., Yermilov S. P., Sinichenko M. I., Ovechkin G. I., Lekanov A. V., Borodin L. M., Khalimanovich V. I., Turkenich R. P., Dvirnyy G. V., Kukushkin S. G., Danilov Ye. N., Sorokvasha G. G., Smirnykh V. N., Zharkova L. V. *Teplovaya truba* [Heat pipe]. Patent RF, no. 2382972, 2008.

© Двирный Г. В., Двирный В. В., Шевчук А. А.,  
Елфимова М. В., Снежко А. А., 2022

УДК 620.3

## МОДИФИКАЦИЯ МОДУЛЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. А. Задорин<sup>1</sup>, С. Ю. Воронина<sup>1</sup>, О. В. Семенуха<sup>1,2</sup>, М. М. Симунин<sup>1,3</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>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина 52

<sup>3</sup>Институт Физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, строение 38  
E-mail: igoza3@rambler.ru

*В работе представлено описание модуля испытательного стенда для исследования функциональных свойств полимерных композитных материалов на основе измерения их электропроводности при деформации, используемых в ракетно-космической технике.*

*Ключевые слова: полимерный композиционный материал, сопротивление изоляции, испытательный стенд, электропроводность, тензорезистивный эффект, тензометрия.*

## MODIFICATION OF THE TEST BENCH MODULE FOR INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A. Zadorin<sup>1</sup>, S. Yu. Voronina<sup>1</sup>, O. V. Semenuha<sup>1,2</sup>, M. M. Simunin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

<sup>2</sup>JSC "Information Satellite Systems" named after Academician M. F. Reshetnev»  
52, Lenina Str., Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation

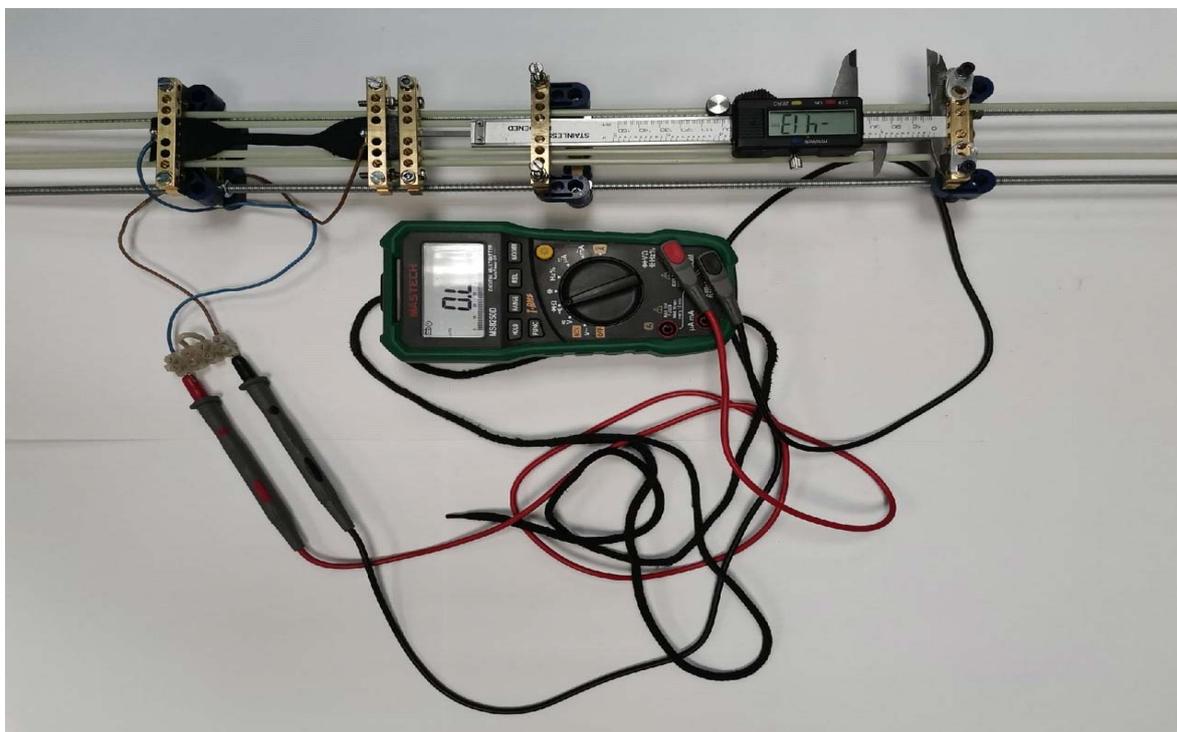
<sup>3</sup>Institute of Physics named after L.V. Kirensky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
50, building 38, Str. Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: igoza3@rambler.ru

*The paper presents a description of the test bench module for studying the functional properties of polymer composite materials based on measuring their electrical conductivity during deformation, used in rocket and space technology.*

*Keywords: polymer composite material, insulation resistance, test stand, electrical conductivity, tensor-resistive effect, strain gauge.*

Испытательный стенд «СТЕН-1» изначально проектировался как инструмент для изучения тензорезистивных свойств полимерных композитных материалов с электропроводящими наполнителями. Данные материалы вызывают интерес при изготовлении конструкций ракетно-космической техники, таких как покрытия корпуса космического аппарата [1], сегментов мембранной оболочки [2], в котором за счет изменения электрического сопротивления при деформации материала представляется возможным определение положения рефлектора антенны. При эксплуатации стенда возникали сложности при проведении исследований в связи с недостаточной точностью динамических измерений при деформации растяжения по причине раскачивания ёмкости силового контура вследствие быстрого набора или сброса жидкости. Это приводило к значительной погрешности измерения сопротивления. Причиной тому являлось: неравномерное примыкание токосъёмных контактов к испытываемому образцу во время деформации сдвига и изгиба.

Поэтому для стабилизации вектора движения силового контура на основе стальных резьбовых шпилек, стеклопластиковых стержней, электротехнических латунных колодок, винтовых соединений, была собрана раздвижная конструкция, закрепляющая опытный образец и цифровой штангенциркуль (см рисунок).



Раздвижная конструкция тензорезистивного модуля

Штангенциркуль с цифровым отсчётным устройством, закреплённый лапками к токосъёмным зажимам винтовыми соединениями, позволяет с высокой точностью (до 0,01 мм) фиксировать изменение размера образца в результате воздействия нагрузки при растяжении. Кроме того, был смонтирован тензорезистивный контур для измерения сопротивления при сжатии. Штангенциркуль контура сжатия закреплён губкой штанги для наружных измерений к основанию ложементу для цилиндрического опытного образца, стоящему на столике весов, а губкой подвижной рамки к верхней полке стенда.

Штангенциркуль, имеющий только одну степень свободы, включённый в измерительную схему, создает дополнительный элемент, исключая скручивание и изгиб опытного образца, зафиксированного в силовом контуре, и снижает погрешность измерений. Посредством обнуления показаний штангенциркулей возможна точная фиксация значения удлинения и укорачивания образца. В силовом модуле испытательного стенда вместо пятилитровых полиэтиленовых канистр были установлены два резервуара из стеклопластика прямоугольного сечения ёмкостью 7,2 литра с трубчатыми креплениями в виде муфт, надетых на вертикальные стойки, позволяющие силовому контуру свободно скользить по направляющим без перекосов и раскачивания. Такая модификация силового модуля дала возможность точного измерения линейной деформации образца полимерного композиционного материала и привела к увеличению точности измерения его сопротивления.

Добавление цифровых штангенциркулей в конструкцию испытательного стенда, и линейная фиксация силовой и дренажной ёмкости, создали условия проведения исследования образцов на новом качественном уровне. Таким образом, проведена модификация силового модуля испытательного стенда по измерению электропроводности.

В процессе проведения работы по модификации была обнаружена возможность использования испытательного стенда для измерения сопротивления изоляции исследуемых образцов полимерных композитных материалов с использованием высоких значений испытательных напряжений путём подключения в схему измерителя сопротивления изоляции "МЕГЕОН 13900"[3].

Следовательно, при интеграции данного контрольно-измерительного прибора, термобарокамеры, климатической камеры в конструкцию лабораторного стенда, позволяющих измерять сопротивление изоляции при экстремальных условиях эксплуатации, существующие перспективы использования данного проекта в научно-исследовательской работе расширятся. В этой комплектации испытательного стенда возможно измерять сопротивление изоляции как для высоковольтных кабелей, так и низковольтных силовых кабелей, входящих не только в сферу технической деятельности аэрокосмической отрасли, но в сферу коммерческой деятельности электронной и электротехнической промышленности.

Подобные комплексные системы используют для испытания космических аппаратов [4]. При соответствующем программном обеспечении данный испытательный стенд возможно использовать в обучающем процессе в сфере образования [5].

### Библиографические ссылки

1. Композиционные электропроводные материалы для терморегулирования и электростатической защиты / Р.А. Ермолаев, В.А. Харламов, И.В. Евкин и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 1. С. 73-80.
2. Тензорезистивный эффект как диагностика трансформации мембранной оболочки рефлектора / О.В. Семенуха, С. Ю. Воронина, М. М. Симунин и др. // Решетневские чтения, Красноярск. 2021. С. 125-126.
3. МЕГЕОН [Электронный ресурс] URL: <https://www.megeon-pribor.ru/katalog/megaommetry/megeon-13900> (дата обращения: 10.09.2022).
4. Комплексные системы для отработки и испытания космических аппаратов / С.В. Кравченко, С.Б. Нестеров, В.А. Романько и др. // Вакуумная техника и технология. 2012. Т. 22. № 4. С. 213-230.
5. Электротехнический комплекс для дистанционного обучения / В.П. Быкова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 109-119.

### References

1. Composite electrically conductive materials for thermal control and electrostatic protection / R.A. Ermolaev, V.A. Kharlamov, I.V. Evkin et al. // Structures from composite materials. 2006. No. 1. S. 73-80.
2. Tensoresistive effect as a diagnosis of the transformation of the membrane shell of the reflector / O.V. Semenukha, S. Yu. Voronina, M. M. Simunin et al. // Reshetnev Readings, Krasnoyarsk, 2021, P. 125-126.
3. MEGEON [Electronic resource] URL: <https://www.megeon-pribor.ru/katalog/megaommetry/megeon-13900> (date of access: 09/13/2022).
4. Complex systems for development and testing of spacecraft / S.V. Kravchenko, S.B. Nesterov, V.A. Romanko et al. // Vacuum equipment and technology. 2012. V. 22. No. 4. S. 213-230.
5. Laboratory practicum performance in electrical engineering and physics using the software and hardware package / Bykova V.P. // Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering. 2021. № 2. С. 109-119.

© Задорин И. А., Воронина С. Ю., Семенуха О. В., Симунин М. М., 2022

УДК 629.8:531.395

## К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ПРИВОДА ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

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

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

*Перспективным направлением использования приводов из материалов с эффектом памяти формы является их применение в крупногабаритных космических конструкциях, схема которых допускает изменение конфигурации или трансформацию. В силовом приводе предлагается использовать активный элемент, изготовленный из проволоки материала никелида титана, обладающего эффектом памяти формы и работающего в условиях одноосного сжатия. Экспериментальные исследования модели привода показали его преимущества, заключающиеся в генерации значительных усилий, малой массе и низкой потребляемой мощности. Для имитации рабочего усилия, развиваемого активным элементом в процессе испытаний, использовались пружинные элементы. Экспериментальная оценка стабильности основных характеристик активных элементов показала, что силовые приводы обеспечат надежное раскрытие перспективных трансформируемых космических конструкций.*

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

## ON THE ISSUE OF CREATING AN ACTUATOR FROM A MATERIAL WITH A SHAPE MEMORY EFFECT FOR TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES

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

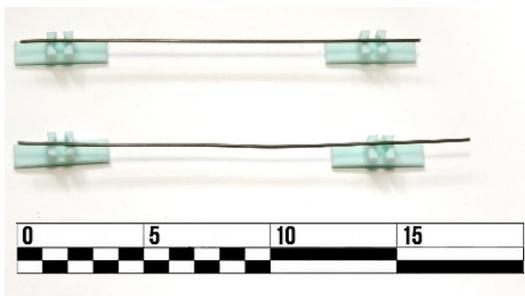
Bauman Moscow State Technical University,  
2-nd Baumanskaya Str., 5, building 1, 105005 Moscow, Russian Federation  
E-mail: zimin@bmstu.ru

*A promising direction of using actuators made of materials with the shape memory effect is their use in large-sized space structures, the scheme of which allows for configuration change or transformation. In the force actuator, it is proposed to use an active element made of a wire of titanium nickelide material, which has a shape memory effect and operates under uniaxial compression conditions. Experimental studies of the actuator model have shown its advantages in generating significant force, low weight and low power consumption. Spring elements were used in the testing process to simulate the working force developed by the active element. An experimental assessment of the stability of the main characteristics of active elements has shown that force actuators will provide reliable opening of promising transformable space structures.*

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

Усложнение конструктивных схем и увеличение габаритов современных крупногабаритных космических конструкций вследствие повышения их функциональных возможностей приводит к необходимости создания систем, имеющих различные конфигурации в транспортном и рабочем состояниях [1]. Процедура раскрытия в космосе таких систем происходит под воздействием силовых приводов. Важным направлением прикладных исследований в области применения материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) является создание на их основе силовых приводов, раскрывающих крупногабаритные космические конструкции, ввиду их хорошей работоспособности в условиях пониженных температур и в вакууме [2]. Приводы с активным элементом из материала с ЭПФ могут быть выполнены в форме проволоки [3]. В качестве активных элементов привода для раскрытия трансформируемых космических конструкций предлагается использовать проволоку диаметром 1,5 мм из мате-

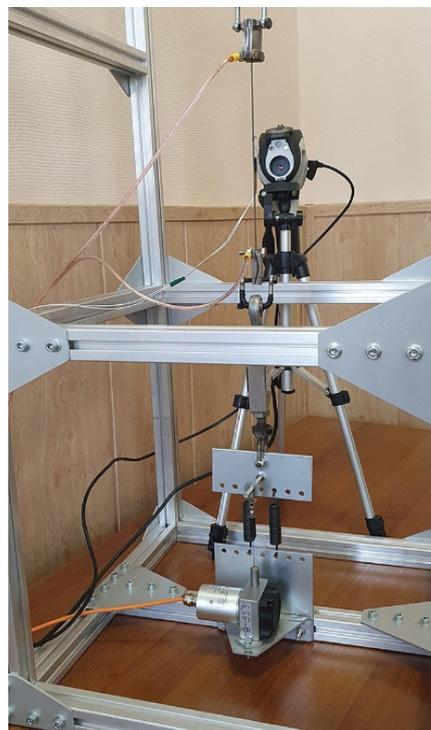
риала никелида титана с ЭПФ. Предварительно активные элементы длиной 160 мм подвергались температурной обработке для устранения возможных внутренних напряжений. Для оценки стабильности параметров активных элементов силового привода были созданы экспериментальные установки для деформирования активных элементов и определения их основных характеристик (см. рисунок).



а



б



в

Экспериментальные установки:

- а – активные элементы из материала никелида титана;  
 б – установка для деформирования активного элемента; в – установка для определения основных характеристик активного элемента

Для имитации рабочего усилия, развиваемого активными элементами в процессе экспериментальных исследований, использовались пружинные элементы в количестве от одного до семи. Для оценки стабильности параметров силового привода были проведены исследования при многократном последовательном повторении цикла растяжение – срабатывание активных элементов. Установлено, что силовые приводы с активными элементами, выполненные из материала никелида титана, обладающего ЭПФ, имеют преимущества, заключающиеся в генерации значительных усилий, малой массе и низкой потребляемой мощности.

В таблице приведены результаты испытаний активного элемента, для имитации рабочего усилия которого в процессе экспериментальных исследований использовались пружинные элементы в количестве от одного до семи.

#### Результаты испытаний

Цикл испытаний	Кол-во пружин	Начальная длина, мм	Деформированная длина, мм	Длина после снятия нагрузки, мм	Длина при нагреве, мм	Длина после полного остывания и снятия нагрузки, мм
1	1	160,0	176,0	174,0	167,0	173,0
	1	173,0	187,0	182,0	173,7	179,1
	1	179,1	193,4	188,0	179,7	185,0

Цикл испытаний	Кол-во пружин	Начальная длина, мм	Деформированная длина, мм	Длина после снятия нагрузки, мм	Длина при нагреве, мм	Длина после полного остывания и снятия нагрузки, мм
2	2	160,0	176,0	174,0	168,0	174,3
	2	174,3	183,8	180,3	173,4	177,8
	2	177,8	186,6	182,8	175,7	179,0
3	3	159,7	177,6	173,8	167,0	170,2
	3	170,2	183,6	179,4	173,5	174,6
	3	174,6	187,7	183,0	176,8	180,0
4	4	160,0	177,1	174,1	169,9	174,1
	4	174,1	183,8	180,2	175,7	178,6
	4	178,6	189,5	185,1	179,8	185,0
5	5	160,8	178,4	174,7	171,0	175,3
	5	175,3	186,3	181,8	178,1	181,3
	5	181,3	192,9	187,8	183,5	187,4
6	6	160,2	178,8	175,2	171,3	175,5
	6	175,5	186,8	182,2	178,6	181,7
	6	181,7	192,6	187,4	183,2	187,0
7	7	159,4	176,8	172,8	169,4	173,4
	7	173,4	183,9	179,6	176,4	178,7
	7	178,7	189,0	184,7	180,5	183,9

### 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., Hemsel, 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.

### 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., Hemsel, 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.

УДК 620.178.4/6

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОТРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ МКА\*

А. А. Иголкин, А. Г. Филипов

Самарский университет  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
E-mail: iskander-filipov@ya.ru

*Представлен анализ возможности применения альтернативного подхода по динамической (вибрационной) отработке малого космического аппарата. Рассмотрено применение аналогичного подхода в зарубежной и отечественной практике, описаны преимущества и недостатки данного подхода.*

*Ключевые слова: вибрационная прочность, динамические испытания, валидация, протоквалификация.*

## CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHOD OF WORKING THE DYNAMIC STRENGTH OF THE STRUCTURE OF A SMALL SPACE VEHICLE

A. A. Igolkin, A. G. Filipov

Samara National Research University  
34, ul. Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: iskander-filipov@ya.ru

*This article presents an analysis of the possibility of using an alternative approach to dynamic (vibration) testing of a small spacecraft. The application of a similar approach in foreign and domestic practice is considered, the advantages and disadvantages of this approach are described.*

*Keywords: vibration strength, dynamic testing, validation, protoqualification.*

Одним из основных этапов жизненного цикла космических аппаратов (КА) является отработка динамической (вибрационной) прочности и как правило этот этап весьма затратный по стоимости и продолжительный по времени.

Отработка вибрационной прочности включает в себя расчётную и экспериментальную отработку. Не смотря на совершенствование методов расчётной отработки прочности с применением подтвердивших свою надёжность программных комплексов (Nastran, Ansys и др.), принятым за основу критерием, подтверждающим расчёт, является его экспериментальная проверка, а в некоторых случаях нагружения (ударная нагрузка, вибрационное нагружение) допускается осуществлять исключительно с экспериментальной проверкой. Однако в ряде случаев те же стандарты регламентируют допущения, позволяющие уточнить номенклатуру отработочных испытаний КА при выполнении определенных условий [1-3]:

- наличие изделий-аналогов, на которых проведены необходимые отработочные испытания КА,
- валидация расчётного анализа нагружения и прочности по результатам эксперимента,
- полный объём проведенной автономной отработки составных частей КА,
- выполнение требований норм прочности по результатам уточненного расчета конструкции КА,
- двойной запас прочности по измененным по сравнению с изделием-аналогом элементам конструкции, но с неизменной силовой схемой, материалами, технологиями изготовления, динамическими характеристиками и т.п.

Анализ конструкторской документации (КД) малого космического аппарата (МКА) «Аист-2Т» и МКА «Аист-2Д» показал, что, не смотря на общую силовую схему и максимальное заимствование бортовой аппаратуры с минимальными доработками, существует несколько принципиальных отличий:

- на МКА «Аист-2Т» добавлен ещё один комплект аппаратуры обеспечения режима стереосъемки,
- существенная переработка схемы установки целевой аппаратуры с применением шарнирного закрепления к силовой платформе КА,

---

\* Исследование проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант №20-31-90083).

– добавление в состав МКА «Аист-2Т» двигательной установки для поддержания параметров орбиты в течение всего срока существования на рабочей орбите.

Изменение состава целевой и обеспечивающей аппаратуры, а, следовательно, и изменение монтажей приборов под измененный состав целевой и обеспечивающей аппаратуры приводит к изменению массово-центровочных и жесткостных характеристик МКА «Аист-2Т» по сравнению с МКА «Аист-2Д».

При приведенных выше различиях от изделия-аналога в соответствии с нормативно-технической документацией, принятой в отрасли, допущение применения расчётно-экспериментального метода к обработке динамической (вибрационной) прочности МКА требует разработки согласованного с заказчиком и головным институтом решения, в котором необходимо определить стратегию подтверждения динамической (вибрационной) прочности изделия, указать порядок работ и уточнения номенклатуры отработочных испытаний МКА в сборе.

Подтверждение целей и решения задач отработки динамической (вибрационной) прочности МКА «Аист-2Т» может быть выполнено с помощью расчётно-экспериментального метода, схема которого приведена на рисунке.



Расчётно-экспериментальный метод динамической (вибрационной) отработки КА

### Библиографические ссылки

1. Н. Ю. Введенский, М. В. Пустобаев Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ, Вопросы электромеханики, Т. 130, 2012, стр. 19-26.
2. ОСТ 92-5100-2002. Аппаратура космических комплексов. Общие технические условия. Взамен ОСТ 92-5100-89; вступил в действие с 01.07.2003. М.: Российским авиационно-космическим агентством, 2002. 174 с.
3. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. Взамен ГОСТ 16504-74; вступил в действие с 01.01.1982. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. 24 с.

### References

1. N. Yu. Vvedensky, M. V. Pustobaev Analysis of testing space technology for mechanical impacts in the US, EU and RF, Electromechanical Issues, Vol. 130, 2012, pp. 19-26.
2. OST 92-5100-2002. Equipment of space complexes. General specifications. Instead of OST 92-5100-89; entered into force on July 1, 2003. M.: Russian Aviation and Space Agency, 2002. 174 p.
3. GOST 16504-81. The system of state testing of products. Testing and quality control of products. Basic terms and definitions. Instead of GOST 16504-74; entered into force on 01/01/1982. M.: USSR State Committee for Standards, 1981. 24 p.

УДК 539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АНИЗОГРИДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ КРУЧЕНИИ

Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева, С. В. Шайдуров

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

*Построены и рассчитаны дискретные модели оболочек с постоянной массой в AnsysMechanical APDL с разной плотностью регулярной сетки. По результатам вычислительного эксперимента при изменении размеров ребер выбраны оптимальные структуры оболочек.*

*Ключевые слова: сетчатая оболочка, ANSYS Mechanical APDL, напряженно состояние, метод конечных элементов, устойчивость, вычислительный эксперимент.*

## 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

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

*Discrete models of shells with constant mass in Ansys Mechanical APDL with different density of a regular grid are constructed and calculated. Based on the results of a computational experiment, the optimal shell structures are selected when the edge sizes change.*

*Keywords: mesh shell, ANSYS Mechanical APDL, stress state, finite element method, stability, computational experiment.*

### Введение

Сетчатые композитные оболочки активно используются в космической промышленности. Данные конструкции обладают сочетанием высоких прочностных характеристик при небольшой массе. На орбите конструкции испытывают кручение. Поэтому актуальной становится задача оптимального подбора параметров сетчатой оболочки фиксированной массы при кручении.

Рассматривается сетчатая оболочка из композиционного материала (углепластик)[1] регулярной структуры при кручении. Структура оболочки включает верхний и нижний шпангоуты, кольцевые и спиральные ребра. Масса конструкции остается неизменной во всех вариантах расчета и раной 165 кг.

В математической среде Mathcad14 был разработан цикл по расчету геометрических параметров на основе исходной модели [2]. За исходную модель принимается конструкция с 72 парами спиральных ребер и углом наклона  $19^\circ$ . Рассчитывались объемы для каждого семейства ребер и, фиксируя один геометрический параметр, вычислялись либо высота реберной структуры, либо ее толщина [3].

Параметрическая дискретная модель строилась и рассчитывалась в программном комплексе *AnsysMechanicalAPDL*. Для этого был написан макрос в основе которого закладывались циклы. Параметрическая дискретная модель строилась на основе следующих входных параметров: высота –  $H(R)$ , количество рядов –  $m$ , число пар спиральных ребер –  $N$ . Особенностью задачи является кручение через мнимый узел, расположенный по центру по высоте конструкции, связанный топологическими связями

с узлами расположенными на верхнем шпангоуте [4]. В реберную структуры закладывался двухузловой элемент с шестью степенями свободы на каждый узел BEAM4, для моделирования топологических связей использовался MPC184 характеризующиеся как ограничительный [5]. Расчет проводился для конструкций с различным углом наклона спирального ребра к образующей от  $14^\circ$  до  $24^\circ$  и плотностью сетки (30,45,60,75,90 и 105 спиральных ребер).

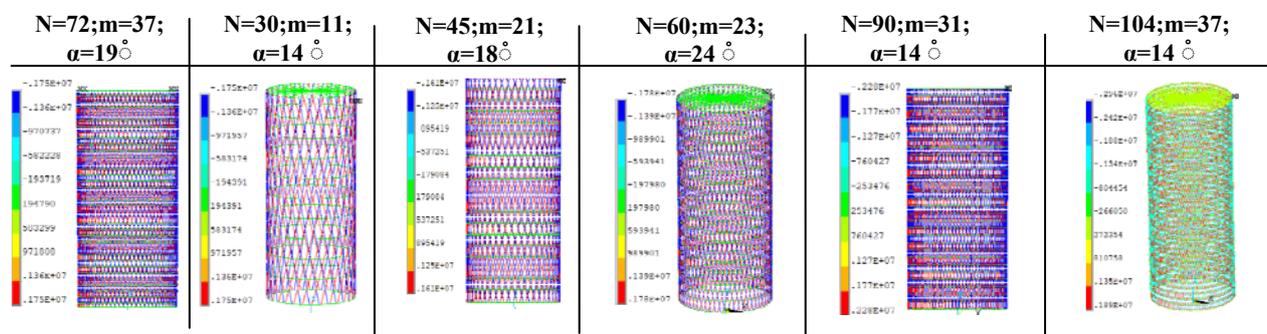


Рис. 1. Результаты численного расчета сеток с различными углами наклона спирального ребра к образующей ( $\alpha$ ) и плотностями ребер ( $N$  – число пар спиральных ребер и  $m$  – число кольцевых ребер)

Анализ напряженно-деформированного состояния сетчатых оболочек при расчете на кручение в 1 т.с. на метр показывает следующее: напряжения и деформации в кольцевых ребрах распределяются ступенчато.

- кольцевых ребрах наблюдаются зоны, как растяжения, так и сжатия, которые чередуются друг с другом.

- спиральные ребра с наклонов вправо растягиваются, а с наклоном влево сжимаются. Абсолютные значения с увеличением плотности реберной структуры максимальных продольных напряжений в спиральных ребрах с наклоном влево и вправо увеличиваются в 1,8 раз. В кольцевых ребрах с увеличением числа пар с 30 до 90 значения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений увеличивается по модулю. В оболочке со 105 парами спиральных ребер по модулю самые максимальные значения напряжений. Данная особенность может проявляться из-за того, что геометрические параметры ребер уменьшаются с увеличением числа пар ребер т. к. масса конструкции фиксирована 165 кг. Форма деформаций кольцевых ребер имеет волнообразный характер. Для спиральных ребер с увеличением плотности сетчатой структуры форма деформаций становится плавной.

Расчет конструкции на устойчивость позволил определить критические моменты при кручении (рис. 2).

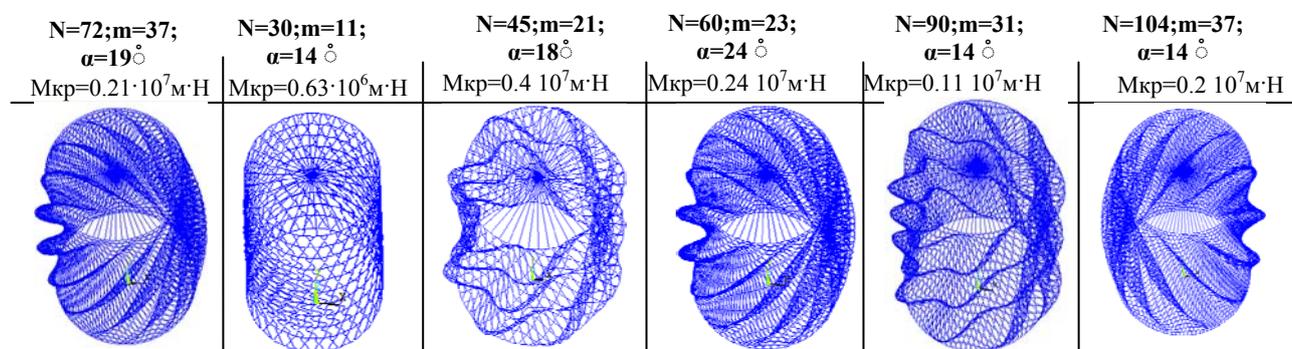


Рис. 2. Формы потери устойчивости сетчатых оболочек при варьировании параметров сетки

Анализ моделей на устойчивость показал, что с увеличением числа пар спиральных ребер и изменение угла наклона спирального ребра к образующей формы потери устойчивости становятся плавными.

В конструкции с разряженной сеткой ребра не способны выдерживать критический момент. Это явление объясняется фиксированной массой, чем разреженной сетка, тем реберная структура толще. Оболочка с 45 парами спиральных ребер и углом наклона  $18^\circ$  имеет максимальный критический момент, оболочка с 30 парами спиральных ребер и углом наклона  $14^\circ$  имеет минимальный критический момент.

### Библиографические ссылки

1. Соломонов Ю.С. Композитные материалы в ракетной и аэрокосмической технике / Ю.С. Соломонов, В.В. Васильев, В.П. Георгиевский // Труды Моск. ин-та теплотехники. 2006. Т. 8. Ч. 1 С. 7- 25.
2. Ковальчук Л. М., Бурнышева Т.В. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотропной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при статическом нагружении / Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т.23. С. 81-92.
3. Ковальчук Л. М. Методика оценки влияния плотности реберной структуры сетчатой оболочки на ее надежность / Л. М. Ковальчук. Текст : непосредственный // Молодежь и будущее авиации и космонавтики : сб. аннотаций конкурсных работ 13 Всерос. межотраслевого молодежного конкурса науч.-техн. работ и проектов, Москва, 22–26 нояб. 2021 г. Москва : Перо, 2021, С. 169-171. 300 экз. ISBN 978-5-00189-644-9.
4. Скворцов Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела [Электронный ресурс] : интерактив. мультимед. пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков // Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). Самара, 2011.
5. Работа в САЕ-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов: метод. указания / сост.: А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 76 с.: ил.

### References

1. Solomonov Yu. With Composite materials in rocket and aerospace engineering / Yu.S. Solomonov, V.V. Vasiliev, V.P. Georgievsky // Trudy Mosk. in-ta heat engineering. 2006. Vol. 8. Part 1 p. 7- 25.
2. Kovalchuk L. M., Burnysheva T.V. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisotropic cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / Siberian Aerospace Journal. 2022. T 23. pp. 81-92.
3. Kovalchuk L. M. Methodology for assessing the effect of the density of the rib structure of the mesh shell on its reliability / L. M. Kovalchuk. Text : direct // Youth and the future of aviation and cosmonautics : collection of abstracts of competitive works 13 Vsros. intersectoral youth competition of scientific and technical works and projects, Moscow, November 22-26, 2021 Moscow : Pero, 2021, pp. 169-171. 300 copies ISBN 978-5-00189-644-9.
4. Skvortsov Yu. V. The use of the ANSYS FEM package for solving problems of deformable solid mechanics [Electronic resource] : interactive. multimed. manual / Yu. V. Skvortsov, S. V. Glushkov // Ministry of Education and Science of Russia, Samara. gos. aerospace. Un-t named after S. P. Korolev (National Research un-t). Samara, 2011.
5. Work in the ANSYS MECHANICAL CAE package: structural analysis by the finite element method: method. instructions / comp.: A.O. Shklovets, V.S. Melentyev. Samara: Publishing House of Samara University, 2018. 76 p.: ill.

© Ковальчук Л. М., Бурнышева Т. В., Шайдуров С. В., 2022

УДК 629.09

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Ладыгин А.П.<sup>1</sup>, Порпылев В.Г.<sup>1</sup>, Надежин М. И.<sup>2</sup>, Юдина З.А.<sup>1</sup>, Ширококов О. В.<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>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1

E-mail: u-z-a@yandex.ru

*Представлены результаты испытаний опытного образца двухступенчатого электронасосного агрегата с применением гидродинамических подшипников скольжения и системой управления и диагностики для использования в космических аппаратах.*

*Ключевые слова: устройство исполнительной автоматики, электронасосный агрегат, система терморегулирования.*

## SPACECRAFT ELECTRIC PUMP TESTING RESULTS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN TASKS OF DIAGNOSTICS

A. P. Ladygin<sup>1</sup>, V. G. Porpylev<sup>1</sup>, M. I. Nadezhin<sup>2</sup>, Z. A. Yudina<sup>1</sup>, O. V. Shirobov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov  
1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmejskaya, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

E-mail: u-z-a@yandex.ru

*This paper presents the test results of two-stage centrifugal electric pump with hydrodynamic bearings and a control and diagnostic system to be operated within the spacecraft.*

*Keywords: automatics, electric pump, thermal control system.*

АО «ИСС» имеет большой опыт эксплуатации электронасосных агрегатов (ЭНА) для жидкостной активной системы терморегулирования космических аппаратов (КА) со сроком активного существования от 3 до 15 лет. К текущему моменту, ЭНА вошел в состав более 40 КА.

Эксплуатируемый ЭНА удовлетворяет потребности текущих платформ, однако для перспективных спутниковых платформ, необходим более мощный насос, с большей эффективностью теплоотвода в совокупности с низкой виброактивностью.

В связи с возрастающими требованиями к энергоэффективности, производительности, надежности ЭНА остро встают задачи точного и достоверного определения его технического состояния во время работы [1]. Конструктивно, ЭНА состоит из электродвигателя (электродвигателей), гидронасоса и преобразователя, обеспечивающего управление электродвигателем. В данной системе преобразователь обеспечивает управление и мониторинг параметров функционирования ЭНА.

Был разработан и испытан ЭНА, в состав электродвигателя которого вместо шарикоподшипников вошли гидродинамические опоры. Такое решение способствует снижению вибрационной активности и увеличению ресурса, поскольку при возникновении гидродинамического режима смазывания в опоре присутствует исключительно жидкостное трение, обеспечивающее полное разделение трущихся поверхностей.

Результаты отработки лабораторной модели приведены в публикации [2]. В данной работе отражены результаты отработки опытного образца ЭНА, в частности, результаты по части отработки системы управления и диагностики электронасосного агрегата (СУ ЭНА).

Разработанный функционал СУ ЭНА позволяет реализовать несколько режимов управления, в том числе отказоустойчивые, выполнять в бортовых условиях диагностику и мониторинг технического состояния ЭНА, имеет расширенные возможности приема-отработки команд и достаточный объем телеметрии [3, 4].

При разработке системы диагностики были применены методы машинного обучения (МО), поскольку, данный метод наиболее эффективен для решения прикладных инженерных задач. Диагностика ЭНА методами МО заключается в решении задачи классификации технических состояний, где каждый класс представляет собой состояние: исправное или дефектное [5]. Количество определяемых дефектных состояний может различаться в зависимости от системы диагностики [6]. Таким образом, была разработана имитационная модель электромеханической части ЭНА, которая позволила отработать алгоритмы подготовки данных, обучения, выбора схемы валидации и настройки гиперпараметров, которые далее были применены для обучения модели на данных, полученных при лабораторных испытаниях реального объекта [1].

Модель, обученная на обработанных сигналах фазных токов, полученных с испытаний реального двигателя, с высокой точностью диагностирует неисправности электрической части двигателя. Также, была проведена отработка алгоритмов управления электродвигателем, способствующим снижению виброактивности.

Разработанная СУ ЭНА позволяет отслеживать состояние оборудования при его эксплуатации, благодаря широкой телеметрии. Примененные методы МО, в последствии, могут давать возможность прогнозирования ресурса. По результатам данного проекта были сформулированы схмотехнические и проектно-конструкторские решения, позволяющие найти подход к снижению вибрационной активности ЭНА для перспективных платформ КА мощностью от 15 кВт.

#### Библиографические ссылки

1. Надежин М. И., Ширококов О. В., Целищев И. А., Гончаров В. О. Применение методов искусственного интеллекта в задаче диагностики технического состояния привода электронасосного агрегата // В сб.: «Молодежь. Техника. Космос»: труды двенадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф. В 4 т. Т. 3. СПб: БГТУ «Военмех», 2020. С. 112–117.
2. Ладыгин А.П, Порпылев В.Г, Синиченко М.И., Юдина З.А., Горбунов А.В. Особенности проектирования и изготовления электронасосного агрегата космического аппарата с низкой виброактивностью // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конфер. (10–12 ноября, 2021, г. Красноярск) : в 2 ч. /подобщ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. С. 96–97.
3. Наземная система комплексной диагностики электромеханических устройств космических аппаратов / Коротков Е.Б., Слободзян Н.С., Ширококов О.В. и др. // Радиопромышленность. 2019. № 4. С. 54–62.
4. Обзор методов диагностики электронасосных агрегатов спутниковых платформ / Матвеев С.А., Жуков Ю.А., Коротков Е.Б. и др. // Радиопромышленность. 2020. Т.30, № 3. С. 86–98.
5. Матвеев, С. А., Коротков, Е. Б., Жуков, Ю. А., Надежин, М. И. Сравнение методов искусственного интеллекта в задачах диагностики электропривода //Extreme Robotics. 2020. Т. 1. №. 1. С. 183–187.
6. Надежин М. И., Слободзян Н. С., Киселев А. А. Улучшение качества моделей классификации отказов для диагностики электромеханических систем // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10. №. 1. С. 73–80.

#### References

1. Nadezhin M. I., SHirobokov O. V., Celishchev I. A., Goncharov V. O. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v zadache diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya privoda elektronasosnogo agregata* [Application of artificial intelligence methods in the problem of diagnosing the technical condition of the electric pump unit drive]. St.Petersburg, Baltic state technical university “VOENMEH” Publ., 2020. P. 112–117.

2. Ladygin A.P., Porpylev V.G., M.I. Sinichenko, Z.A. Yudina, A.V. Gorbunov. *Osobennosti proektirovaniya i izgotovleniya elektronasosnogo agregata kosmicheskogo apparata s nizkoj vibroaktivnost'yu* [Spacecraft electric pump designing and manufacturing features]. // Reshetnevskie chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. [Materials XXV Intern. Scientific Conf "Reshetnev reading"]. Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2021. P. 96–97.

3. Korotkov E. B., Slobodzyan N. S., Shirobokov O. V., Kiselev A. A., Nadezhin M. I. [Complex ground diagnostic system for spacecraft electromechanical devices]. *Radiopromyshlennost' Publ.*, 2019. No. 4. P. 54–62 (In Russ.).

4. Matveev S. A., Zhukov Y. A., Korotkov E. B., Shirobokov O. V., Nadezhin M. I., Ladygin A. P. [Overview of diagnostic methods for electric pump units of satellite platforms]. *Radiopromyshlennost' Publ.*, 2020. No. 3. P. 86–98 (In Russ.).

5. Matveev S. A., Zhukov Y. A., Korotkov E. B., Nadezhin M. I. [Comparison of artificial intelligence methods in tasks of electric drive diagnostics]. *Extreme Robotics*, 2020. Vol. 1. №. 1. P. 183–187 (In Russ.).

6. Nadezhin M. I., Slobodzyan N.S., Kiselev A. A. [Improving quality of the faults' classification models for electromechanical systems' diagnostics]. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2022. 10(1). P. 73–80 (In Russ.).

© Ладыгин А. П., Порпылев В. Г., Надежин М. И., Юдина З. А., Ширококов О. В., 2022

УДК 536.248.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ В ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

А. А. Литвинцева<sup>1,2\*</sup>, В. В. Чеверда<sup>1,2</sup>, И. С. Вожаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 1  
<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет  
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1  
E-mail: \*nastja\_\_@mail.ru

*В данной работе экспериментально исследовались режимы течения в пульсационной тепловой трубе. Проведена серия экспериментов по исследованию теплообмена в тепловой трубе. Определены параметры, при которых запускается тепловая труба. Получены значения температуры в зоне нагревателя при запуске тепловой трубы.*

*Ключевые слова: Пульсационная тепловая труба, теплообмен, пузырь Тейлора, тонкие пленки жидкости.*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW REGIMES IN A PULSATING HEAT PIPE

A. A. Litvintseva<sup>1,2\*</sup>, V. V. Cheverda<sup>1,2</sup>, I. S. Vozhakov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the RAS  
1, Ac. Lavrentieva Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation  
<sup>2</sup>Novosibirsk State University  
1, Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russia Federation  
E-mail: \*nastja\_\_@mail.ru

*In this work, the flow regimes in a pulsating heat pipe were investigated. A series of experiments was carried out to study heat transfer in a heat pipe. The parameters under which the heat pipe starts work are determined. The temperature values in the heater zone of the heat pipe are obtained.*

*Keywords: Pulsation heat pipes, heat transfer, Taylor bubble, thin liquid films.*

**Введение.** Тепловая трубка – это пассивный теплообменник без движущихся частей, работающий в широком диапазоне температур и тепловых потоков. Благодаря своим конструктивным преимуществам (гибкость, компактность), высокой теплопередаче и высокой эффективности без дополнительного потребления энергии, тепловые трубы нашли применение во многих областях, от охлаждения микроэлектроники до космических применений [1].

Пульсационные тепловые трубы (ПТТ) очень простые в производстве (даже по сравнению с другими видами тепловых труб) и практически не содержат элементов, которые могут выйти из строя во время работы. Кроме того, ПТТ используют пленочный режим испарения в Тейлоровских пузырях, а именно при таком режиме наблюдается максимальный теплоотвод. Поэтому пульсационные тепловые трубы являются одним из наиболее эффективных способов отвода тепла [2, 3].

**Экспериментальный стенд.** Данная работа посвящена экспериментальному исследованию режимов работы пульсационной тепловой трубы. Экспериментальный стенд представляет собой ПТТ с одним витком для исследования гидродинамики и теплообмена двухфазного течения (см. рисунок). Пульсационная тепловая труба состоит из медной трубки внутренним диаметром 2 мм и толщиной стенки 1 мм. Общая длина медной трубки составляет 600 мм. Для визуализации процессов в тепловой трубе сделана вставка (2) из кварцевого стекла длиной 100 мм с внутренним диаметром также 2 мм и толщиной стенки 1 мм.

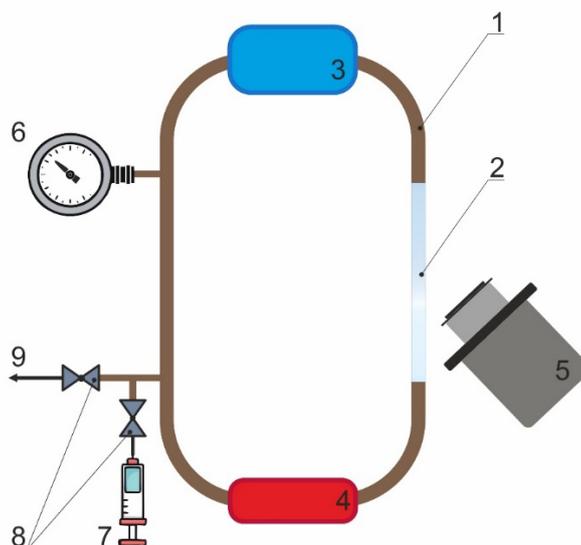


Схема экспериментального стенда.

1 – пульсационная тепловая трубка, 2 – кварцевая трубка,  
3 – теплообменник, 4 – нагреватель, 5 – фотоаппарат Nikon D7000  
и ИК-сканера Titanium HD 570M, 6 – датчик давления, 7 – шприц  
с рабочей жидкостью, 8 – клапан, 9 – вакуумный насос

**Результаты.** Проведена серия экспериментов по исследованию теплообмена в тепловой трубе С помощью термопар К-типа регистрировалась температура в испарителе, конденсаторе и адиабатной зоне. Измерения осуществлялись с помощью АЦП National Instruments NI9214. С помощью датчика давления Wika P-30 измерялось давление в ПТТ. Датчик подключён к компьютеру через АЦП National instruments USB-6001. Через теплообменник на конденсаторе с помощью термостата Loip прокачивается жидкость при заданной температуре. Нагрев осуществляется при помощи нагревательного элемента длиной максимальной мощностью 200 Вт. Распределение температур вдоль ПТТ помимо термопар контролировалось с помощью ИК-сканера Titanium HD 570M. Были определены параметры ( $dT$  и  $P$ ) запуска тепловой трубы, а также получены значения температуры в зоне нагревателя при запуске тепловой трубы.

#### Библиографические ссылки

1. Faghri, A., Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology // Journal of Heat Transfer, 2012, 134 (12).
2. Zhang Y.W., Faghri A., Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes // Heat Transfer Eng., 2008, 29 (1), pp. 20–44.
3. Xiao L, Cao Y. Recent advances in pulsating heat pipes and its derivatives // Journal of Enhance Heat Transfer, 2012, 19(3), pp. 213–231.

#### References

1. Faghri, A., Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology // Journal of Heat Transfer, 2012, 134 (12).
2. Zhang Y.W., Faghri A., Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes // Heat Transfer Eng., 2008, 29 (1), pp. 20–44.
3. Xiao L, Cao Y. Recent advances in pulsating heat pipes and its derivatives // Journal of Enhance Heat Transfer, 2012, 19(3), pp. 213–231.

© Литвинцева А. А., Чеверда В. В., Вожаков И. С., 2022

УДК 669.713.7

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ  
 ГИБКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УПРАВЛЯЕМЫМИ  
 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

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 теоретические основы являющиеся базой для исследований и разработок нового класса конструкций авиационно-космической техники позволяющие реализовать подходы по созданию конструкций с изменяемыми морфологическими и функциональными характеристиками изделий с применением в конструкции управляемой гибкой структуры на основе эластичной матрицы и армирующих элементов, изменяющих свои характеристики в процессе их функционирования, с целью управления морфологией конструкции (её формой) и функциональными свойствами (теплопроводностью, коэффициентом демпфирования и т. п.).*

*Ключевые слова: реконфигурируемые конструкции, морфологические характеристики, функциональные свойства актуаторы, фазовый переход, композиционные структуры.*

**THEORETICAL FOUNDATIONS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT  
 OF FLEXIBLE COMPOSITE STRUCTURES WITH CONTROLLED PHYSICAL  
 AND MECHANICAL CHARACTERISTIC**

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 theoretical foundations are presented, which are the basis for research and development of a new class of aerospace engineering structures, allowing to implement approaches to create structures with variable morphological and functional characteristics of products using a controlled flexible structure based on an elastic matrix and reinforcing elements that change their characteristics during their operation, in order to control the morphology of the structure (its shape) and its functional properties (thermal conductivity, damping coefficient, etc.).*

*Keywords: reconfigurable structures, morphological characteristics, functional properties, actuators, phase transition, composite structures.*

Создание конструкций, изменяющих свою форму, структуру и меняющих свои функционально-эксплуатационные характеристики в процессе работы с учётом меняющихся внешних и внутренних условий, является актуальной задачей для многих систем авиационно-космической техники. В работе рассмотрены морфологически изменяемые структуры, к которым можно отнести реконфигурируемые антенны, крылья ЛА с изменяемой формой и геометрией, гибкие робототехнические системы [1]. Одной из важнейших задач при разработки таких систем является создание распределённой системы актуации, связанная с проблемой организации внутренней структуры актуаторов интегрированных в гибкую композиционную конструкцию. Рассмотрены основные структурные элементы таких систем, в частности архитектура нагревательного элемента (НЭ) термоактивного актуатора [1]. Разработан новый вид НЭ на основе композитного электро- и теплопроводного материала (КЭТМ). Композиционная структура НЭ (рис. 1) состоит из эластичной матрицы на основе металлических волокон, собранных в ленточную структуру.

Рассмотрены задачи, создания инженерной аналитической методики расчёта такой структуры с оценкой влияния анизотропии структуры на ее прочность, электропроводность и теплопроводность. Для описания стохастического волокнистого материала построена трехмерная периодическая модель контактируемых друг с другом стержней, основанная на механике сплошной среды. Используя подход, связанный с усреднением волокон по объему получены выражения для осевой и поперечной относительной деформации КЭТМ:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X} = \left( \frac{16F_x}{9E_f} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z} = \left( -\frac{16F_z}{9E_f} \right) \left( \frac{L}{D} \right)^2, \quad (2)$$

где  $F_x$  и  $F_z$  – компоненты нагрузки,  $E_f$  - модуль волокна, а  $L$ ,  $D$  - длина и диаметр волокна, соответственно. Деформация волоконного наполнителя приводит к изменению формы волокон, как показано на рис. 2. Прогнозируемые изменения формы, полученные с использованием уравнений (1) и (2) представлены на рис. 2 и зависят от соотношения сторон сегмента волокна,  $L/D$ .



Рис. 1. Нагревательный элемент из КЭТМ и его микроструктура



Рис. 2. Исходная и деформированная структуры КЭТМ

Полученные результаты показали, что деформация волоконной сети зависит от соотношения  $L/D$  волокон. Установлено, что электрическое сопротивление, нельзя считать постоянным по всему образцу КЭТМ и его величина зависит от  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_z$ . Пьезорезистивный отклик материала можно регулировать, изменяя параметры структуры наполнителя, размеры волокон ( $L$ ,  $D$ ), их объёмную долю и жёсткость контакта волокон. Электрический ток, проходящий через КЭТМ, зависит от анизотропных свойств наполнителя и различается на порядок в зависимости от того, как расположены оси большинства волокон относительно направления тока, что объясняет разницу в сопротивлении при различных значениях относительной деформации (рис. 3)

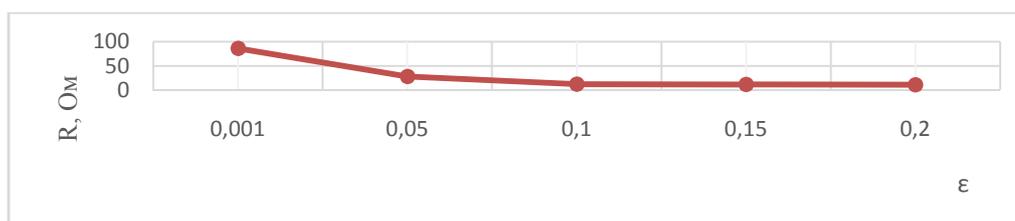


Рис. 3 Изменения сопротивления КЭТМ от величины относительной деформации при растяжении

Для определения теплопередачи в процессе нагрева и охлаждения НЭ рассмотрены задача передачи тепла (3) для волокнистой среды, ориентированной под углом  $\theta$  по отношению к тепловому потоку (рис.4):

$$\lambda_c(\theta) = [\varphi\lambda_f + (1 - \varphi)\lambda_m]\cos\theta + \left(\frac{\lambda_f\lambda_m}{\varphi\lambda_m + (1-\varphi)\lambda_f}\right)\sin\theta, \quad (3)$$

где  $\lambda_c$  - теплопроводность КЭТМ,  $\theta$ - угол ориентации волокна,  $\lambda_f$  - теплопроводность волокна,  $\lambda_m$  - теплопроводность матрицы,  $\varphi$  – процентное содержание волокна в КЭТМ. Для случая распределения волокон случайным образом использованы решения, основанные на модели двухфазной эффективной теплопроводности (модель Гамильтона) [3]:

$$\frac{\lambda_c}{\lambda_{opa}} = \frac{\alpha + (n-1) + (n-1)(\alpha-1)\varphi}{\alpha + (n-1) + (1-\alpha)\varphi}, \quad (4)$$

Здесь  $\alpha = \lambda_f / \lambda_m$ ,  $n$  – эмпирический коэффициент формы.

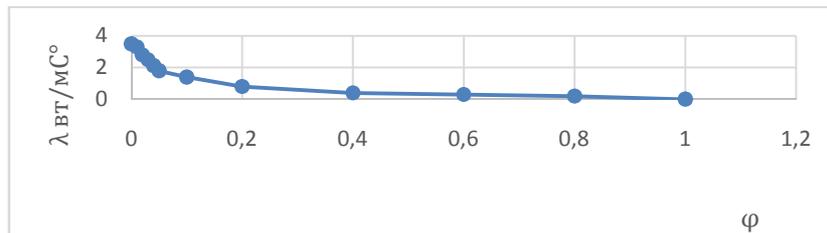


Рис. 4. Зависимость теплопроводности КЭТМ от относительного объема волокон

Результаты исследований показывают, что существует зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  КЭТМ от процентного содержания волокна (рис. 4), имеющая существенно нелинейный характер, что позволяет с учётом нелинейности электрического сопротивления структуры КЭТМ согласованно регулировать тепловое поле актуатора, а следовательно, и развиваемое им усилие.

### Библиографические ссылки

1. Лихачёв А.Н. Исследование создания деформируемых гибких композиционных структур с изменяемой жесткостью на основе гидравлических принципов // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. Т. 1 «Вооружение, военная и специальная техника. 2022. С. 93-96.
2. Лихачёв А.Н. Экспериментально-теоретические исследования создания морфинговых композиционных конструкций на основе управляемого гибкого каркаса с изменяемой жесткостью // Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч. конф. (10-13 ноября, 2021, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. Ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2021. С.100-101.
3. Jagjiwanram, Singh R., Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems // Applied Thermal Engineering, 2004. Vol. 24, Pp. 2727-2735.

### References

1. Likhachev A.N. Research of creation of deformable flexible composite structures with variable rigidity based on hydraulic principles // Actual problems of protection and safety. Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference RARAN. Vol. 1 "Armament, military and special equipment. 2022. pp.93-962
2. Likhachev A.N. Experimental and theoretical studies of the creation of morphing composite structures based on a controlled flexible frame with variable rigidity // Reshetnev Readings : materials of the XXV International Scientific Conference. (November 10-13, 2021, Krasnoyarsk) : at 2h./under the general Editorship of Yu. Yu. Loginov ; Sib. gos. aerospace. Krasnoyarsk University, 2021. С.126-128.
3. Jagjiwanram, Singh R., Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems // Applied Thermal Engineering, 2004. Vol. 24, Pp. 2727-2735.

УДК 669-1

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. С. Марченко, М. А. Ковалёва\*, Г. А. Байгонакова, С. В. Пономарев

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36  
\*E-mail: marina.kovalyova.16@gmail.com

*В данной работе оцениваются перспективы применения многофункциональных материалов из никелида титана в аэрокосмической области, а также приводятся возможные варианты трансформируемых конструкций, которые функционируют за счет функциональных свойств сплава TiNi.*

*Ключевые слова: эффект памяти формы, аэрокосмическая промышленность, сплавы TiNi, многофункциональные материалы, термоциклирование, активные элементы.*

## PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF SHAPE MEMORY MATERIALS FROM TITANIUM NICKELIDE IN THE AEROSPACE FIELD

E. S. Marchenko, M. A. Kovaleva\*, G. A. Baigonakova, S. V. Ponomarev

National Research Tomsk State University  
36, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation  
\*E-mail: marina.kovalyova.16@gmail.com

*This paper evaluates the prospects for the use of multifunctional titanium nickelide materials in the aerospace field, and also presents possible designs that function due to the properties of the TiNi alloy.*

*Keywords: shape memory effect, aerospace industry, TiNi alloys, multifunctional materials, thermal cycling, active elements.*

**Введение.** Уникальные свойства многофункциональных материалов из никелида титана вызывают значительный интерес в различных областях науки и техники, от биомедицинских до аэрокосмических применений. В рамках ракетно-космического применения большой интерес к сплавам с эффектом памяти формы (ЭПФ) связан с возможностью проектирования компактных и управляемых систем с меньшей сложностью и размерами по сравнению со стандартными технологиями и возможностью изменения формы при изменении внешних условий. В работе представлены преимущества многофункциональных сплавов из никелида титана с заданными свойствами перед другими материалами и представлены механизмы управления свойствами под действием внешних факторов и условий эксплуатации (температуры, механической циклической нагрузки и т. д.).

Сплавы с ЭПФ в отличие от традиционных материалов демонстрируют особое поведение, заключающееся в способности восстанавливать первоначальную форму при нагревании выше определенных критических температур (ЭПФ) (рис. 1, а) или выдерживать высокие деформации, восстанавливаемые при разгрузке (эффект сверхэластичности) (рис. 1, б) [1-2].

Эффект памяти формы сплава TiNi заключается в способности ненагруженного материала под воздействием внешнего напряжения и изменения температуры накапливать обратимую деформацию до 8%, а при нагреве, либо в процессе снятия внешнего напряжения, проявляя сверхэластичность, восстанавливать первоначальную форму. ЭПФ в данных сплавах является циклическим и способность сплава обратимо восстанавливать форму не теряется вплоть с увеличением количества реализаций эффекта. Деформация может накапливаться при активном нагружении, а также при изменении температуры сплава, находящегося под воздействием одноосного или сдвигового напряжения.

Благодаря указанным свойствам материалы из TiNi и являются очень перспективными для использования в аэрокосмической промышленности. Например, приводы с активным элементом из сплава с ЭПФ позволят управлять процессом раскрытия, при этом избавят от необходимости использовать всевозможные демпферы для гашения ударных нагрузок, которые возникают, например,

при использовании обычных пружин, развертывающих конструкцию за счет предварительно запасенной упругой энергии [3].

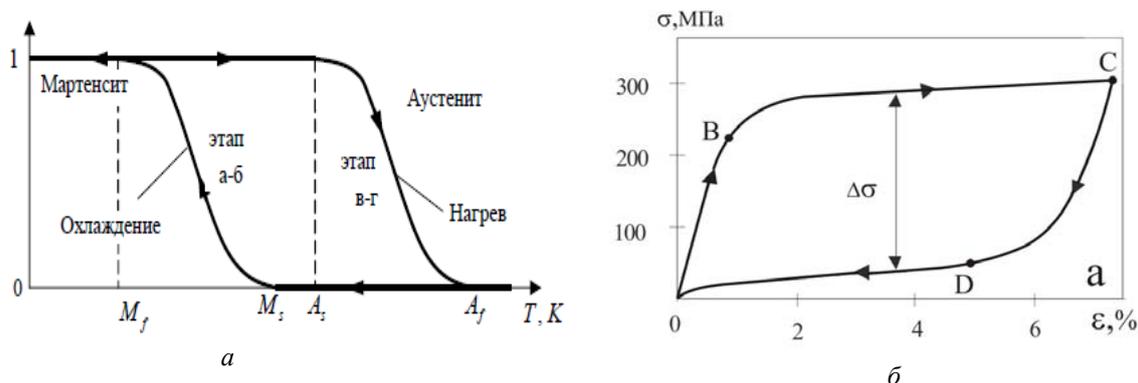


Рис. 1. Диаграммы проявления:  
*a* – эффекта памяти формы; *б* – эффекта сверхэластичности

В лаборатории сверхэластичных биоинтерфейсов Томского государственного университета из сплавов никелида титана марок ТН-10, ТН-20, ТН-ВТ, ТН-ХЭ изготавливаются различные конструкции и устройства. В зависимости от области применения проектируются те или иные изделия: сетки, пористые элементы, дуги, спирали, антенны и т.д. (рис. 2). Изменяя соотношение титана и никеля или вводя легирующие добавки (Fe, Mg, V, Cr, Mo, Nb) можно управлять фазовыми переходами, воздействовать на ширину петли гистерезиса и смещать температуры переходов в интервале от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ .

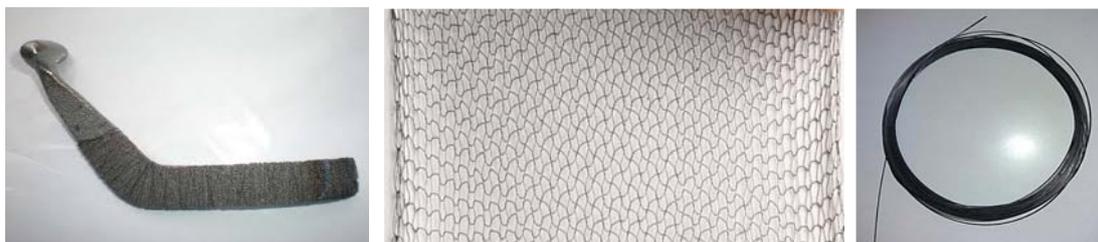


Рис. 2. Примеры конструкций из никелида титана, изготавливаемые в лаборатории сверхэластичных биоинтерфейсов Томского государственного университета

Трансформирующие функциональные конструкции из сплава с памятью формы TiNi применяются в качестве элементов гибридных конструкций или композиционных материалов, обжимных муфт и соединительных втулок, дублирования гидроприводов [2].

Сочетание функциональных свойств TiNi позволяет реализовывать высокопрочные неразъемные соединения. В настоящее время, для получения многих конструкций используются различные способы сварки и пайки, а наибольшие возможности связаны с использованием промежуточных прослоек, которые позволят избежать формирования хрупких интерметаллических фаз в неразъемных соединениях. Также, перспективным направлением является создание компонентов вентиляторного сопла с изменяемым сечением, демпферов колебаний и приводов и адаптирующего крыла с изменяемой геометрией формы в летательных аппаратах [4].

Данные устройства принимают требуемую форму благодаря изменению температуры под действием воздушного потока вокруг летательного аппарата или даже смене температуры окружающей среды во время обычного полета. Изменение температуры, вызывающее фазовый переход, можно обеспечить разными способами. В устройстве из сплава с ЭПФ может присутствовать нагревающий электронный компонент, или же изменение температуры можно вызвать подачей излишка воздуха из аппарата.

При разработке конструкции или компонента из сплава с памятью формы необходимо учитывать факт длительного периода фазового изменения, время возврата материала в исходную форму и температурные интервалы проявления ЭПФ.

Возможности и перспективы использования сплавов с ЭПФ в аэрокосмической области:

- узлы крепления, захваты, термочувствительные механические приводы;
- термомеханический крепеж и заклепки для авиационной техники;
- активные элементы, трансформируемые термочувствительные силовые исполнительные конструкции различной конфигурации, в том числе выдвижные телескопические штанги, самосрабатывающие и самораспрямляющиеся, шарнирно соединенные, телескопические и параболические антенны, фермы, например, для космической техники, воздухозаборники с изменяемой геометрией для самолетов, шевроны (зубцы на кромке сопла) с изменяемой геометрией для двигателей самолетов и другие устройства авиа- и космического назначения;
- приводы и исполнительные элементы устройств и механизмов, работающих в агрессивных атмосферах (космические излучения, ядерные энергетические установки, ускорители, исследовательские и промышленные ядерные установки); термокомпенсаторы деформаций и натяжений в элементах конструкций [5, 6].

Инфраструктура лаборатории сверхэластичных биоинтерфейсов ТГУ и многолетний опыт разработки сплавов из TiNi позволили начать работу над созданием активных термочувствительных элементов из сплава никелида титана, как актюаторов для самораскрывающихся конструкций в аэрокосмической области, способных до 100 циклов обратимо восстанавливать форму в экстремальных условиях эксплуатации.

### Библиографические ссылки

1. Costanza Gi., Elisa T. Shape Memory Alloys for Aerospace, Recent Developments, and New Applications: A Short Review // *Materials*, 2020. Vol. 13, №8, 1856.
2. Senkevich K.S. Prospects of production and application of titanium alloy and nitinol hybrid structures and composites. Overview // *Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2017. Vol. 4. P. 71-78.
3. Mathematical modeling of the deployment of a large transformable space structure / V. N. Zimin, Z. Zikun, A. V. Krylov, S. A. Churilin // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2171. P. 030002-1–030002-5.
4. Hattalli, V.L., Sritvasa, S.R. Wing morphing to improve control performance of an aircraft An overview and a case study // *Mater. Today Proc.*, 2018. Vol. 5. P. 21442–21451.
5. Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетнокосмической техники / В.А. Барвинок, Богданович В.И., Грошев А.А. и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15 № 6. С. 272–277.
6. Разработка реверсивных силовых приводов из материалов с эффектом памяти формы для устройств, применяемых в узлах расчеховки космических аппаратов / В. А. Барвинок, Богданович В. И., Ломовской О. В. и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 301–306.

### References

1. Costanza Gi., Elisa T. Shape Memory Alloys for Aerospace, Recent Developments, and New Applications: A Short Review // *Materials*, 2020. Vol. 13, №8, 1856.
2. Senkevich K.S. Prospects of production and application of titanium alloy and nitinol hybrid structures and composites. Overview // *Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2017. Vol. 4. P. 71-78.
3. Mathematical modeling of the deployment of a large transformable space structure / V. N. Zimin, Z. Zikun, A. V. Krylov, S. A. Churilin // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2171. P. 030002-1–030002-5.
4. Hattalli, V.L., Sritvasa, S.R. Wing morphing to improve control performance of an aircraft An overview and a case study // *Mater. Today Proc.*, 2018. Vol. 5. P. 21442–21451.
5. V.A. Barvinok, Bogdanovich V.I., Groshev A.A. et al. Methodology for designing power drives from a material with a shape memory effect for rocket and space technology // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. Vol. 15. № 6. p. 272–277. (In Russ.)
6. Barvinok V. A., V. I. Bogdanovich, O. V. Lomovskoy et al. Development of reversible power drives from materials with shape memory effect for devices used in spacecraft pinning units // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy Sciences*. 2011. Vol. 13. №. 4 (2). p. 301–306. (In Russ.)

УДК 629-238.9

## УПРАВЛЯЕМОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ТОРМОЗНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

П. П. Моисеев, А. И. Викторов, Д. А. Бабанков

ООО «Научно-производственное предприятие «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрены системы разворачивания панелей солнечных батарей космических аппаратов. Показано управляемое механическое тормозное устройство для разворачивания панелей солнечных батарей космического аппарата. Описана его конструкция.*

*Ключевые слова: управляемое механическое тормозное устройство, солнечные батареи, управляемое разворачивание.*

## CONTROLLED MECHANICAL BRAKING DEVICE FOR SPACECRAFT SOLAR PANELS DEPLOYMENT

P. P. Moiseev, A. I. Victorov, D. A. Babankov

«Scientific-production enterprise «ASTRON ELECTRONICS» Ltd.  
2, Veselaya Str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*The system of deployment of spacecraft solar panels is considered. A controlled mechanical braking device for deploying spacecraft solar panels is shown. Its design is described.*

*Keywords: controlled mechanical braking device, solar panels, managed deployment.*

Системы разворачивания панелей солнечных батарей (СБ) космических аппаратов (КА) из транспортного положения в рабочее положение строятся в основном с применением электромеханических приводов раскрытия [1], систем тросовой синхронизации и элементов задержки. В [2] предложен неуправляемый механизм раскрытия с постоянной скоростью на основе регулятора с анкерным спуском. В [3] предложено управляемое устройство раскрытия подвижных узлов КА с изменением скорости в процессе движения, с применением электромагнитов. В данных устройствах не производится контроль в ходе процесса разворачивания панелей СБ, и для реализации этого контроля в конструкцию шарнирного узла (ШУ) раскрытия необходимо дополнительно вводить датчик угла поворота (ДУП).

На рисунке показан внешний вид механического тормозного устройства (МТУ), в котором реализована возможность управления разворачиванием панелей СБ, контроля угла поворота ШУ, изменения скорости и промежуточного останова в процессе движения.

МТУ имеет в своем составе мультипликатор, спусковой регулятор с одним штифтовым колесом и двумя фиксирующими лопатками, два магнитоэлектрических привода стопорения фиксирующих лопаток и ДУП штифтового колеса. Скорость поворота штифтового колеса регулируется за счет частоты подачи последовательности напряжений на электромагнитные катушки приводов стопорения. При удержании напряжения на одном из приводов стопорения происходит останов разворачивания. В случае аварийного снятия напряжений с электромагнитных катушек приводов стопорения происходит продолжение разворачивания СБ за счет пружин кручения ШУ.

Применение ДУП в составе МТУ позволяет контролировать процесс разворачивания панелей СБ, организовать одновременное разворачивание нескольких панелей с остановом некоторых из них для обеспечения безопасного движения других.



Внешний вид механического тормозного устройства

#### Библиографические ссылки

1. Пат. 2472284 Российская Федерация, МПК H02P8/20 (2006.01). Электромеханический привод раскрытия / Порпылев В.Г., Черепанов Д.А., Леканов А.В., Халиманович В.И. №2011119197/11: заявл. 12.05.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.
2. Пат. на полезную модель 96360 Российская Федерация, МПК B64G 1/00 (2006/01). Пружинный механизм для раскрытия подвижных узлов космического аппарата / Эдличко А.А., Янгулов В.С.; №2010108269/22. Заявл. 05.03.2010; опубл. 27.07.2010, Бюл. №21.
3. Пат. на полезную модель 180495 Российская Федерация, МПК B64G 1/00 (2006/01). Устройство раскрытия подвижных узлов космического аппарата / Моисеев П. П., Викторов А. И., Подмастерьев А. К. № 2017122877: заявл. 27.06.201; опубл. 14.06.2018, Бюл. № 17.

#### References

1. Pat. 2472284 Russian Federation, IPC H02P8/20 (2006.01). Electromechanical opening drive / Porpylev V.G., Cherepanov D.A., Lekanov A.V., Khalimanovich V.I. No. 2011119197/11: Appl. 05/12/2011; publ. 01/10/2013, Bull. No. 1.
2. Pat. for utility model 96360 Russian Federation, IPC B64G 1/00 (2006/01). Spring mechanism for opening the moving parts of the spacecraft / Edlichko A.A., Yangulov V.S.; No. 2010108269/22. Appl. 03/05/2010; publ. 27.07.2010, Bull. No. 21.
3. Pat. for utility model 180495 Russian Federation, IPC B64G 1/00 (2006/01). The device for opening the moving parts of the spacecraft / Moiseev P. P., Viktorov A. I., Podmasterev A. K. No. 2017122877: Appl. 06/27/201; publ. 06/14/2018, Bull. No. 17.

© Моисеев П. П., Викторов А. И., Бабанков Д. А., 2022

УДК 629.78:681.2

## КОМПРЕССИОННЫЕ ОТРЫВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНИТЕЛИ 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: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрены отрывные электрические соединители, показаны компрессионные отрывные электрические соединители с пружинными контактами и устройством предварительной расстыковки.*

*Ключевые слова: отрывные электрические соединители, пружинные контакты, устройство предварительной расстыковки.*

## COMPRESSION TEAR-OFF ELECTRICAL CONNECTORS FOR SPACECRAFT SEPARABLE 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: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Tear-off electrical connectors are considered, compression tear-off electrical connectors with spring contacts and a preliminary undocking device are shown.*

*Key words: tear-off electrical connectors, spring contacts, pre-undocking device.*

При расстыковке разделяемых конструкций космического аппарата (КА) возникает необходимость в применении отрывных электрических соединителей (ОЭС) для разрыва электрических цепей электропитания, передачи информации и для контроля разрыва контактов и отделения конструкций. Для обеспечения надежного отсоединения контактов в [1] предложены ОЭС с разрывными контактами и компрессионные ОЭС с пружинными контактами.

При использовании ОЭС с разрывными контактами необходимо учитывать, что они позволяют произвести расстыковку соединителя однократно, поэтому при наземной отработке КА для восстановления электрических цепей необходимо проводить переустановку контактов в корпусе ОЭС, что требует специальной подготовки специалистов и значительного времени, либо полностью заменять ОЭС, что довольно затратно. Применение компрессионных ОЭС с пружинными контактами позволяют обеспечить многократную расстыковку соединителей без необходимости проведения ремонтных работ.

На рисунке показаны компрессионные ОЭС с 64 и 29 контактами и датчик контроля отделения (ДКО) с 4 контактами.

Представленные компрессионные ОЭС состоят из двух отделяемых частей, при этом соединители с 64 и 29 контактами имеют в своем составе устройство предварительной расстыковки контактов для уменьшения воздействия на отделяемую конструкцию КА от пружинных контактов соединителя. Для обеспечения надежного отсоединения контактов после их длительной эксплуатации в компрессионных ОЭС применяются контактные пары из графита и покрытого золотом бронзового пружинного контакта.

В соединителях с 64 и 29 контактами для контроля предварительного расстыковки контактов задействованы 4 контакта, поэтому в этих ОЭС для непосредственного подключения электрических цепей предназначены 60 и 25 контактов.

ДКО имеет миниатюрные габаритные размеры и предназначен для контроля отделения конструкций КА, поэтому электрический соединитель расположен только на одной его части, со стороны подключения кабеля, а на второй части внутри установлены только перемычки из графита.



Внешний вид компрессионных ОЭС с 64 контактами (слева), с 29 контактами (справа) и ДКО с 4 контактами (снизу)

Соединители имеют три положения: транспортное, рабочее и расстыкованное. В транспортном положении составные части ОЭС соединены, а на их корпусах установлены технологические приспособления, обеспечивающие необходимое усилие для сжатия контактных пар ДКО, и приспособления, фиксирующие спусковой механизм устройства предварительной расстыковки в соединителях с 64 и 29 контактами. В рабочем положении ОЭС должны быть установлены на конструкциях КА, с них должны быть сняты технологические приспособления, и в соединителях с 64 и 29 контактами вместо технологической должна быть установлена рабочая фиксирующая чека.

Расстыковка ОЭС с 64 и 29 контактами проходит в два этапа. На первом этапе внешним воздействием извлекается фиксирующая чека, что приводит к срабатыванию пружинного механизма устройства предварительной расстыковки, который обеспечивает внутреннее отсоединение контактов соединителя и снимает фиксацию замков механического соединения составных частей. Полная расстыковка частей ОЭС, происходит за счет отделения друг от друга конструкций КА.

Для уменьшения габаритных размеров и массы компрессионных ОЭС возможно применение конструкции, в которой не будет устанавливаться устройство предварительной расстыковки контактов, а необходимое усилие для сжатия контактных пар соединителей будет обеспечиваться конструкциями КА, как в случае применения ДКО. При этом необходимо учитывать воздействие пружинных контактов соединителя на отделяемую конструкцию КА.

### 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. 1. С. 110–111.

### 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.)

© Моисеев П. П., Викторов А. И., Смирнов В. А., Нечушкин И. И., 2022

УДК 629.7

**ПРОРЫВНОЕ ДВИЖЕНИЕ БЕЗ ПРОПЕЛЛЕНТА: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ  
СОЗДАНИЯ ТЯГИ В ДВИГАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ К-РЕЗОНАТОРА  
С ПОМОЩЬЮ АДАПТЕРА/ИНТЕРФЕЙСА К ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ  
ИЗМЕРЕНИЯМ ВСЕЛЕННОЙ**

А. В. Овчар

ООО «ДиКонт»

Российская Федерация, 196655, Колпино, г. Санкт-Петербург, ул. Культуры, 14  
E-mail: info@dikont.ru

*В статье рассматривается идея создания тяги двигателя без пропеллента на основе К-резонаторов (СВЧ резонаторов бегущей волны кольцевой формы) для создания практической технологии передачи импульса из закрытой СВЧ подсистемы наружу с помощью адаптера (интерфейса) к дополнительным измерениям вселенной.*

*Ключевые слова: движение без пропеллента, СВЧ резонатор, дополнительные измерения вселенной.*

**BREAKTHROUGH MOTION WITHOUT PROPELLENT: PHYSICAL PRINCIPLES  
OF THRUST GENERATION IN AN ENGINE BASED ON A K-RESONATOR USING  
AN ADAPTER/INTERFACE TO ADDITIONAL DIMENSIONS OF THE UNIVERSE**

A. V. Ovchar

LLC "DiKont"

14, Kultura Str., Kolpino, Saint Petersburg, 196655, Russian Federation  
E-mail: info@dikont.ru

*This report discusses the idea of creating engine thrust without propellant (reactive mass transportable) based on K-resonators (circular-shaped microwave traveling wave resonators) to create a practical technology for transferring momentum from a closed microwave subsystem to the outside using an adapter (interface) to additional dimensions of the universe.*

*Keywords: propellantless propulsion, microwave cavity, additional dimensions of the universe.*

В работе [1] рассматривается идея космического двигателя на основе СВЧ резонатора V-образной формы, где кривая часть V-резонатора может местом для создания адаптера, интерфейса к «новой физике» [2-3] для космических полетов, за счет алгоритма 3-х импульсов [1].

В работе [4] обсуждается идея космического двигателя на основе К-резонатора. При этом показано, что в известных дизайнах содержится принципиальное техническое противоречие, когда СВЧ резонатор не может создать тягу двигателя, так как в резонаторе создаются стоячие волны [5].

В работе [6] обсуждается возможная физика для создания тяги двигателя на основе двух (пары) К-резонаторов, на основе обсуждаемого в мировой научной литературе явления «вскипания вакуума» («boiling the vacuum») [7-9]. Когда бортовые запасы энергии используются для «вскипания вакуума» и синтеза потоков пропеллента.

В работе академика РАН В.А. Рубакова "Большие и бесконечные" [10] обсуждается широкий спектр теоретических подходов к «теории всего», в т.ч. на основе многомерной модели вселенной.

Теория «всего» (строения вселенной) еще не построена. С точки зрения «наблюдателя невежественного» [11] создание тяги двигателя (что не использует запасы возимой реактивной массы) может выглядеть как волшебство (магия). Поэтому, мы предлагаем алгоритм проектирования космического двигателя, на основе К-резонаторов, что отличается тем, что содержит в себе адаптер (интерфейс) к

новой физике, к дополнительным измерениям вселенной, и где на стадии проектирования сразу ставится смелая цель получения «странного», «магического» результата.

К-резонатор может быть изготовлен на основе хорошо известной СВЧ техники, в дизайне адаптера можно применить различные технологии формирования скин-слоя на основе регулярных микро [12] и нано[13] рельефов, покрытий с переменным химическим составом [14]. Тогда, проходящие (через скин-слой) потоки электромагнитной энергии в К-резонаторе могут «зацепить» дополнительные измерения вселенной и (если это физически возможно) использовать это как полезный ресурс системы для создания тяги двигателя. Так как плотность энергии в сверхпроводящем К-резонаторе может быть на 10 порядков выше, чем в идеальной фотонной ракете, то можно ожидать значения удельной тяги двигателя на 10 порядков выше, до уровня 6000 Н/кВт (Если коэффициент сцепления потоков ЭМ энергии с ресурсами вселенной близко к 1).

### Библиографические ссылки

1. Овчар А.В. Прорывное движение без пропеллента: Исследовательский стенд для изучения новых физических принципов для космических полетов // Материалы XXIV Междунар. науч. конф. (10–13 ноября 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2020. Т.1 С. 107-109.
2. Nobel Laureate Steven Weinberg reminisces about the early days of the standard model of particle physics and offers advice to the next generation of model builders. . [Электронный ресурс] URL: <https://physics.aps.org/articles/v11/134> (дата обращения 07.09.2022).
3. «Новая физика» или «За пределами Стандартной модели» [Электронный ресурс]. URL: <https://elementy.ru/LHC/HEP/SM/beyondSM> (дата обращения 07.09.2022).
4. Овчар А.В. Прорывное движение без пропеллента: Двигатель на основе К-резонатора // Материалы XXV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2021, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2021. Т.1 С. 115-116.
5. Greg Egan. Resonant Modes of a Conical Cavity [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gregegan.net/SCIENCE/Cavity/Cavity.html> (дата обращения 07.09.2022).
6. Овчар А.В. Прорывное движение без пропеллента: физические принципы создания тяги в двигателе на основе К-резонатора // Материалы XLVI Академические чтения по космонавтике, препринт. [Электронный ресурс]. URL: <https://korolev.bmstu.press/preprints/2202/> (дата обращения 07.09.2022).
7. Ringwald A. Boiling the vacuum with an x-ray free electron laser; arXiv:hep-ph/0304139v1 (2003).
8. Фортв В. Е. "Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе" УФН 179 653–687 (2009) DOI: 10.3367/UFNr.0179.200906h.0653.
9. Frontiers in High Energy Density Physics: The X-Games of Contemporary Science (Washington, DC: National Acad. Press, 2003).
10. Рубаков В. А. "Большие и бесконечные дополнительные измерения" УФН 171 913–938 (2001).
11. Gajdos T., Kandil F. The ignorant observer. Soc Choice Welfare 31, 193 (2008). <https://doi.org/10.1007/s00355-007-0274-8>.
12. Omatsu T. Vortex-laser microprocessing. (Микроигла (массив) высотой более 10 мкм и диаметром менее 0,3 мкм формируется путем нанесения на металл всего нескольких лазерных импульсов). [Электронный ресурс]. URL: <https://spie.org/news/3271-vortex-laser-microprocessing?ArticleID=x43234&SSO=1> (дата обращения 07.09.2022).
13. Новый материал Флатландии: физики получили (квази) двумерное золото. [Электронный ресурс]. URL: [https://mipt.ru/newsblog/lenta/novyy\\_material\\_flatlandii\\_fiziki\\_poluchili\\_kvazi\\_dvumernoe\\_zoloto](https://mipt.ru/newsblog/lenta/novyy_material_flatlandii_fiziki_poluchili_kvazi_dvumernoe_zoloto) (дата обращения 07.09.2022).
14. Аверкиев Н. С., Слипченко С. О., Соколова З. Н., Тарасов И. С.. Диэлектрический волновод для среднего и дальнего инфракрасного излучения // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. № 8. С. 1073-1077. EDN RCPZAZ.

### References

1. Ovchar A.V. [Breakthrough motion without propellant: a research stand for studying new physical principles for space flight]. *Materialy XXIV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2020, p. 107–109. (In Russ).

2. Nobel Laureate Steven Weinberg reminisces about the early days of the standard model of particle physics and offers advice to the next generation of model builders. Available at: <https://physics.aps.org/articles/v11/134> (accessed 07.09.2022).
3. "New Physics" or "Beyond the Standard Model" Available at: <https://elementy.ru/LHC/HEP/SM/beyondSM> (accessed 03.07.2022).
4. Ovchar A.V. [Breakthrough motion without propellant: R-cavity engine]. *Materialy XXV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2021, p. 115–116. (In Russ.).
5. Greg Egan. Resonant Modes of a Conical Cavity Available at: <http://www.gregegan.net/SCIENCE/Cavity/Cavity.html> (accessed 07.09.2022).
6. Breakthrough motion without propellant: physical principles of creation of thrust in the generation in the R-cavity engine [Materials XLVI Academic readings on astronautics, preprint. Available at: <https://korolev.bmstu.press/preprints/2202/> (accessed 07.09.2022).
7. Ringwald A. Boiling the vacuum with an x-ray free electron laser; arXiv:hep-ph/0304139v1 (2003)
8. Fortov V. E. "Extreme states of matter on Earth and in space" *Phys. Usp.* **52** 615–647 (2009); DOI: 10.3367/UFNe.0179.200906h.0653.
9. *Frontiers in High Energy Density Physics: The X-Games of Contemporary Science* (Washington, DC: National Acad. Press, 2003).
10. Rubakov V.A. "Large and infinite extra dimensions" *Phys. Usp.* **44** 871–893 (2001); DOI: 10.1070/PU2001v044n09ABEH001000.
11. Gajdos T., Kandil F. The ignorant observer. *Soc Choice Welfare* 31, 193 (2008). <https://doi.org/10.1007/s00355-007-0274-8>.
12. Omatsu T. Vortex-laser microprocessing. (A microneedle with a height greater than 10 $\mu$ m and a diameter less than 0.3 $\mu$ m is formed by deposition of only a few laser pulses onto a metal). Available at: <https://spie.org/news/3271-vortex-laser-microprocessing?ArticleID=x43234&SSO=1> (accessed 07.09.2022).
13. New Flatland material: physicists have obtained (quasi) two-dimensional gold. Available at: [https://mipt.ru/newsblog/lenta/novyy\\_material\\_flatlandii\\_fiziki\\_poluchili\\_kvazi\\_dvumernoe\\_zoloto](https://mipt.ru/newsblog/lenta/novyy_material_flatlandii_fiziki_poluchili_kvazi_dvumernoe_zoloto) (accessed 07/09/2022).
14. Averkiev N.S., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Tarasov I.S DIELECTRIC WAVEGUIDE FOR MIDDLE AND FAR INFRARED RADIATION. *Semiconductors*. 2009. T. 43. № 8. С. 1036-1039.

© Овчар А. В., 2022

УДК 629.7

## ПРОРЫВНОЕ ДВИЖЕНИЕ БЕЗ ПРОПЕЛЛЕНТА: АНОМАЛЬНАЯ ТЯГА В ДВИГАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ V-РЕЗОНАТОРА

А. В. Овчар

ООО «ДиКонт»

Российская Федерация, 196655, Колпино, г. Санкт-Петербург, ул. Культуры, 14

E-mail: info@dikont.ru

*В докладе рассматриваются новые результаты моделирования космического двигателя без пропеллента на основе V-резонаторов (СВЧ резонатора V-образной формы). В ходе моделирования, обнаружен нетривиальный результат, когда силы радиационного давления в замкнутой СВЧ полости, в сумме на интервале времени не равны нулю. Что явно указывает на то, что в такой полости возможно создание тяги двигателя, без использования возимого запаса реактивной массы (пропеллента).*

*Ключевые слова: движение без пропеллента, СВЧ резонатор, силы радиационного давления*

## BREAKTHROUGH MOTION WITHOUT PROPELLANT: ABNORMAL THRUST IN A V-RESONATOR BASED ENGINE

A. V. Ovchar

LLC "DiKont"

14, Kultura Str., Kolpino, Saint Petersburg, 196655, Russian Federation

E-mail: info@dikont.ru

*The report discusses new results of modeling a space engine without propellant based on V-resonators (V-shaped microwave resonator). During the simulation, a non-trivial result was found, when the forces of radiation pressure in a closed microwave cavity, in total over a time interval, are not equal to zero. This clearly indicates that in such a cavity it is possible to create engine thrust without using a portable stock of jet mass (propellant).*

*Keywords: propellantless propulsion, microwave cavity, forces of radiation pressure*

Здесь мы обсуждаем новые результаты моделирования электромагнитных явлений в двигателе на основе V-резонатора [1]. Мы случайно нашли неожиданный, полезный результат, когда после создания в системе потоков специально подготовленных ЭМ волн (разно полярные импульсы негармонической формы) – в узкой части V-резонатора наблюдается особая интерференция встречных разно полярных импульсов. В симуляции наблюдается локальная, взаимная нейтрализация электрической компоненты ЭМ поля.

При этом, за счет специально разработанной симметрии дизайна – наблюдается выраженная асимметрия суммарных сил радиационного давления. В таком дизайне силы радиационного давления явно не равны нулю, и калькуляция суммарного импульса в системе поле-резонатор также показывает не нулевой результат. Более того, этой диспропорцией удастся хорошо управлять – просто меня геометрию узкой части.

Предварительно, мы можем подумать о необычном алгоритме распространения и отражения ЭМ волн в СВЧ резонаторе сложной формы, с локальной нейтрализацией сил радиационного давления. В итоге, если допустить, что ЭМ поле в СВЧ резонаторе существует «само по себе», то мы нашли способ создать направленную силу давления со стороны ЭМ поля на СВЧ резонатор в замкнутой системе. Это создает тягу двигателя.

Сразу следует отметить, что такая резонансная полость, возможно, обладает низкой добротностью, но в полости нет явного поглощения импульсов. Если СВЧ полость сделать из сверхпроводника, то резонатор может накопить порядка миллиарда импульсов, и тяга движителя будет зависеть не

от величины добротности, а от количества накопленных (сохраненных) в полости ЭМ импульсов. Это может быть большое число, на уровне 10 порядков, и тяга двигателя может на 10 порядков превысить тягу идеальной фотонной ракеты – до 6000 Н/кВт. Такой двигатель позволит построить практичный дизайн космического аппарата с бортовым источником электроэнергии на уровне 0,1–1 МВт, для полета на Марс за 42 часа.

Мы обращаемся к научной общественности с просьбой оказания технической помощи для уточнения расчетной модели и проведения лабораторного эксперимента.

#### **Библиографические ссылки**

15. Овчар А.В. Прорывное движение без пропеллента: Исследовательский стенд для изучения новых физических принципов для космических полетов // Материалы XXIV Междунар. науч. конф. (10–13 ноября 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2020 Т.1 С. 107-109

#### **References**

1. Ovchar A.V. [Breakthrough motion without propellant: a research stand for studying new physical principles for space flight]. *Materialy XXIV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2020, p. 107–109. (In Russ)

© Овчар А. В., 2022

УДК62-347

## РАЗРАБОТКА ПРИВОДА БАТАРЕИ СОЛНЕЧНОЙ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. В. Павелко<sup>1</sup>, Р. П. Силиванов<sup>1</sup>, Д. А. Замятин<sup>1,2\*</sup>, И. С. Грибков<sup>1</sup>, Е. А. Улыбушев<sup>1</sup>

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

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, 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: zamyatin.denis2011@yandex.ru

*Создание опережающего задела в части привода батареи солнечной для малых космических аппаратов, с высокими параметрами энергопередачи, повышенным ресурсом работы, стабильностью энергопередачи в течение всего срока активного существования.*

*Ключевые слова: привод батареи солнечной, батарея солнечная, малый космический аппарат.*

## DEVELOPMENT OF A SOLAR BATTERY DRIVE FOR SMALL SPACECRAFT

S. V. Pavelko<sup>1</sup>, R. P. Silivanov<sup>1</sup>, D. A. Zamyatin<sup>1,2\*</sup>, I. S. Gribkov<sup>1</sup>, E. A. Ulybushev<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: zamyatin.denis2011@yandex.ru

*Leading development of the solar battery drive for small spacecraft, with high power relay parameters, increased operational life, stability of power relay during the entire active lifetime.*

*Keywords: solar battery drive, solar battery, small spacecraft.*

**Введение.** Стремительное развитие информационных технологий привело к возрастающей потребности использования таких услуг, как интернет, подвижная и фиксированная связь, теле- и радиовещание. Для удовлетворения этой потребности необходимо создание группировки малых космических аппаратов (КА).

Важным элементом космического аппарата являются солнечные батареи (СБ), обеспечивающие автономное непрерывное энергопитание КА. Для обеспечения постоянной ориентации СБ на Солнце и передачу электроэнергии от СБ в систему электропитания КА служит привод батареи солнечной (ПБС). От стабильности работы ПБС в течение всего срока активного существования (САС) зависит работоспособность КА.

Применяемые в настоящее время решения в части ПБС обеспечивают стабильную работу КА, но имеют большую массу, в связи с чем невозможно их использование на малых КА.

Основной проблемой, решаемой при создании ПБС для малых КА, является уменьшение массы ПБС при обеспечении высокого уровня стабильности работы.

**Цель.** Создание опережающего задела в части ПБС для малых КА, с высокими параметрами энергопередачи, повышенным ресурсом работы и стабильностью энергопередачи на протяжении всего САС.

**Задачи.** 1 – Разработка нового силового токосъемного устройства (СТУ) с уменьшенной массой и высокой износостойкостью; 2 – объединение СТУ и телеметрического токосъемного устройства (ТТУ) в одном корпусе для уменьшения габаритных размеров и массы ПБС. 3 – Разработка редуктора ПБС новой компоновки. Изготавливаемые в настоящее время ПБС разработки АО «ИСС» имеют

следующие функциональные части: 1 – корпус; 2 – редуктор; 3 – электродвигатель (ЭД); 4 – датчик угла (ДУ); 5 – силовое токосъемное устройство (СТУ); 6 – телеметрическое токосъемное устройство (ТТУ). В конструкции ПБС применяется СТУ с контактными кольцами (рис. 2).

Принцип работы СТУ – подшипник с упругими кольцами с токопроводящим покрытием. Сепаратор выполнен из роликов, расположенных между токопроводящими кольцами и исключают трение колец между собой. Внутренняя обойма подшипника крепится на валу, а наружная устанавливается в корпус сборки СТУ. Данное решение отработано и позволяет обеспечивать высокие параметры энергопередачи [1, 2]. Подтвержденный ресурс СТУ составляет не менее 15000 оборотов. Минусом данной конструкции является трудоемкость сборки и настройки прибора, а также большая масса [3].

Разработано новое СТУ на основе пружинных контактов (рис. 1). Принцип работы – электрический контакт обеспечивается за счет упругого поджатия пружинящих контактов. От неподвижных колец идут провода к электрическим соединителям корпуса БМ, а от пружинящих контактов к соединителям выходного вала. Кольца и пружинящие контакты имеют токопроводящее покрытие. Применение пружинящих контактов в конструкции СТУ позволило объединить его в одном корпусе с ТТУ, которое построено по тому же принципу.



Рис. 1. Внешний вид ПБС и СТУ

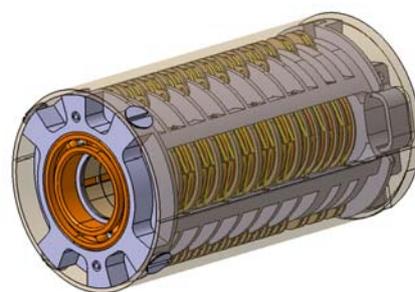


Рис. 2. Внешний вид разработанного СТУ

Принятое конструктивное решение позволило уменьшить размеры СТУ, исключить селективные группы входящих деталей и, как следствие, сократить стоимость и производственный цикл изготовления прибора, а также существенно сократить массу. Так, если построенное на основе контактных колец СТУ на 4 электрических цепи (8 слоев колец) имеет массу порядка 500 г., то разработанное СТУ, при том же количестве электрических цепей, объединенное в одном корпусе с ТТУ на 6 цепей, имеет массу 130 г.

Ресурсные испытания ПБС, в составе которого было применено СТУ новой конструкции, проведенные в рамках данной работы, показали стабильность электрических параметров СТУ в течение всей наработки ресурса 100000 оборотов (табл. 1).

Таблица 1

Падение напряжения на СТУ при токе 3.7 А на силовом кольце

Количество оборотов выходного вала	Падение напряжения, В							
	1 кольцо	2 кольцо	3 кольцо	4 кольцо	5 кольцо	6 кольцо	7 кольцо	8 кольцо
0 (начало испытаний)	0.0559	0.0566	0.0561	0.0563	0.0579	0.0572	0.0570	0.0566
20000	0.0564	0.0572	0.0570	0.0568	0.0578	0.0572	0.0566	0.0563
40000	0.0576	0.0582	0.0579	0.0578	0.0589	0.0583	0.0579	0.0574
60000	0.0576	0.0581	0.0577	0.0576	0.0587	0.0585	0.0579	0.0574
100000	0.0577	0.0595	0.0581	0.0579	0.0591	0.0587	0.0583	0.0579

Увеличение ресурса и стабильность электрических параметров были достигнуты за счет разработки нового пружинящего контакта и изменения конструкции неподвижных колец (рис. 3), что обеспечило увеличение площади контактной поверхности.

Также в рамках представленной работы была проведена разработка цилиндрического четырехступенчатого редуктора с расположением зубчатых колес на двух осях (рис. 4). Такая компоновка позволила сократить размеры редуктора и его массу [4].

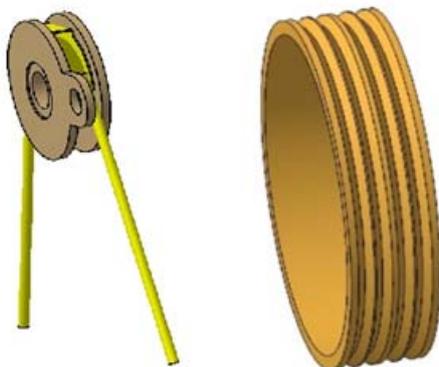


Рис. 3. Пружинящий контакт и неподвижное кольцо

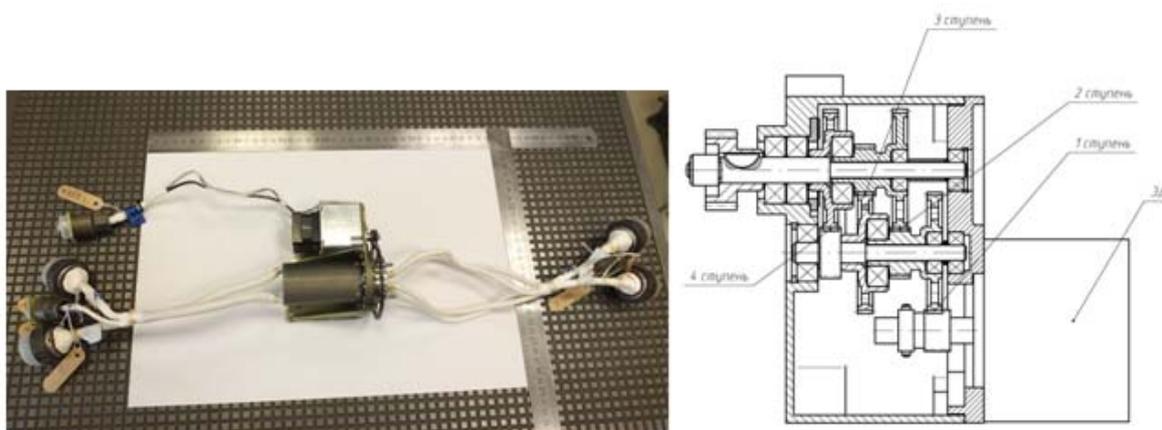


Рис. 4. Внешний вид и редуктор ПБС

Созданный в рамках работы ПБС имеет следующие параметры (табл. 2).

Таблица 2

**Основные параметры ПБС**

Наименование	Значение
Скорость вращения вала БМ ПБС, °/мин	от 0 до 8
Погрешность отработки углового положения, °	± 3
Момент, развиваемый на валу, Н-м, не менее	4,9
Количество силовых цепей ТУ	8 (4 – цепи «+», 4 – цепи «-»)
Максимальный ток через силовую цепь, А	3,7
Максимальное рабочее напряжение, В	75
Количество телеметрических цепей ТУ	6
Габаритные размеры, мм, не более	102 x 78 x 121
Масса БМ ПБС, кг, не более	0,6 (без учета соединителей)

**Новизна.** Создание СТУ с новыми пружинящими контактами и изменение компоновки редуктора позволили создать ПБС с малой массой и высоким ресурсом (не менее 100000 оборотов). Данная разработка подходит для использования в малых КА.

**Полученные и ожидаемые результаты.** В процессе разработки ПБС для малых КА была отработана технология изготовления пружинных контактов новой конструкции, изменена конструкция не-

подвижных колец, отработан процесс сборки СТУ с пружинящими контактами и редуктора измененной компоновки. Применение нового подхода к созданию СТУ на пружинящих контактах позволило многократно увеличить ресурс устройства и практически полностью устранить ухудшение электрических свойств СТУ в процессе эксплуатации [5]. Разработанная конструкция ПБС обладает низкой массой, что позволяет использовать ее в малых КА. Полученные результаты соответствуют поставленным задачам. Аналог разработанного ПБС планируется использовать для КА, изготавливаемых в рамках темы «Марафон IoT». Высокие показатели электрических свойств и ресурса разработанного СТУ позволяют рассматривать возможность использования данного подхода не только на малых КА, но и при разработке новых КА различного назначения и энергетической мощности.

#### Библиографические ссылки

1. Патент № 2543136 С2 Российская Федерация, МПК F16H 57/00. Многоканальное токосъемное устройство : № 2013108115/11 : заявл. 22.02.2013 : опубл. 27.02.2015 / В. Г. Порпылев, В. И. Халиманович, Л. И. Беляева ; заявитель Открытое акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнева". EDN OLRDRQ.
2. Патент № 2466069 С2 Российская Федерация, МПК B64G 1/44. Система поворота солнечной батареи : № 2011104900/11 : заявл. 09.02.2011 : опубл. 10.11.2012 / В. Г. Порпылев, В. А. Соколенко, А. В. Леканов, В. И. Халиманович ; заявитель Открытое акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва". EDN WXMOWS.
3. Патент № 2570006 С2 Российская Федерация, МПК B64G 1/44. Система поворота солнечной батареи большой мощности : № 2014102218/11 : заявл. 23.01.2014 : опубл. 10.12.2015 / А. В. Токарев, В. Г. Порпылев, А. В. Леканов, В. И. Халиманович ; заявитель Акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва". EDN OBPZQG.
4. Чуйкина, Л. В. Тенденции развития приводов раскрытия / Л. В. Чуйкина, В. Г. Порпылев, Д. О. Чуйкин // Решетневские чтения. 2010. Т. 1. С. 93-94. EDN UNKGRD.
5. Черепанов, Д. А. Проблемы обеспечения надежности приводов раскрытия / Д. А. Черепанов, В. Г. Порпылев // Решетневские чтения. 2009. Т. 1. С. 89-90. EDN VBEEFT.

#### References

1. Patent No. 2543136 C2 Russian Federation, IPC F16H 57/00. Multichannel current collector : No. 2013108115/11 : application. 22.02.2013 : publ. 27.02.2015 / V. G. Porpylev, V. I. Khalimanovich, L. I. Belyaeva ; applicant Open Joint Stock Company "Information Satellite Systems" named after Academician M.F. Reshetnev". EDN OLRDRQ.
2. Patent No. 2466069 C2 Russian Federation, IPC B64G 1/44. Solar battery rotation system : No. 2011104900/11 : application 09.02.2011 : publ. 10.11.2012 / V. G. Porpylev, V. A. Sokolenko, A.V. Lekanov, V. I. Khalimanovich ; applicant Open Joint Stock Company "Information Satellite Systems" named after Academician M.F. Reshetnev". EDN WXMOWS.
3. Patent No. 2570006 C2 Russian Federation, IPC B64G 1/44. High-power solar battery rotation system : No. 2014102218/11 : application 23.01.2014 : publ. 10.12.2015 / A.V. Tokarev, V. G. Porpylev, A.V. Lekanov, V. I. Khalimanovich ; applicant Joint-Stock Company "Information Satellite Systems" named after Academician M.F. Reshetnev". EDN OBPZQG.
4. Chuykina, L. V. Trends in the development of disclosure drives / L. V. Chuykina, V. G. Porpylev, D. O. Chuykin // Reshetnev readings. 2010. Vol. 1. pp. 93-94. EDN UNKGRD.
5. Cherepanov, D. A. Problems of ensuring the reliability of disclosure drives / D. A. Cherepanov, V. G. Porpylev // Reshetnev readings. 2009. Vol. 1. pp. 89-90. EDN VBEEFT.

© Павелко С. В., Силиванов Р. П., Замятин Д. А.,  
Грибков И. С., Улыбушев Е. А., 2022

УДК 629.76/78.001.63

## ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ТРУБЫ

С. А. Пикулин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: 19pikuln@mail.ru

*Представлена программа для автоматизированного выбора схемы армирования композитных труб, удовлетворяющих заданным требованиям для применения в конструкциях космического аппарата.*

*Ключевые слова: схема армирования, коэффициент температурного расширения, жесткость*

## A PROGRAM FOR CALCULATING THE RATIONAL REINFORCEMENT SCHEME OF A COMPOSITE PIPE

S. A. Pikulin

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: 19pikuln@mail.ru

A program for the automated selection of a reinforcement scheme for composite pipes that meet the specified requirements for use in spacecraft structures is presented.

*Keywords: reinforcement scheme, coefficient of thermal expansion, stiffness*

В процессе проектирования КА часто возникает необходимость проектирования композитных звеньев различных конструкций, обеспечивающих одновременно следующие характеристики: размеростабильность (при температурных воздействиях), жесткость, размеры и массу не выше заданных [1].

Зачастую данные звенья выполняют в виде труб из углепластика с определенной слоевой структурой, заданием которой и обеспечиваются перечисленные характеристики. Трубы изготавливают методом мокрой намотки жгутов углепластика. Перед началом проектирования композитной трубы необходимо определить характеристики однонаправленного слоя [2], если они не известны.

Целью данной работы являлось создание программы, автоматически рассчитывающей схему армирования углепластиковой трубы по заданным ограничениям и характеристикам материала.

В качестве входных данных для программы выступают: требуемая жесткость на изгиб; требуемая жесткость на кручение; ограничение на диаметр трубы; ограничение на удельную массу сечения (произведение площади сечения на плотность материала); характеристики монослоя однонаправленного композита, являющегося материалом трубы; характеристики для расчета толщин слоев в зависимости от угла армирования (толщины для некоторых заданных углов армирования).

Последнее условие крайне важно для правильного расчета характеристик трубы. В зависимости от угла намотки кривизна линии, на которую ложится жгут углепластика меняется. От этого зависит величина сдавливания жгута. При этом максимальная толщина жгута достигается при угле укладки  $0^\circ$  (кривизна равна бесконечности, жгут ложится на прямую). Минимальная толщина достигается при угле укладки  $90^\circ$  (кривизна равна кривизне трубы). В программе учитывается зависимость толщины слоя от угла армирования путем задания минимальной и максимальной толщин слоя. Промежуточные значения определяются методом линейной интерполяции.

Следует отметить, что при необходимости требуемая толщина слоя может быть обеспечена за счет изменения количества жгутов в слое. Однако такой метод предполагает осуществление

дополнительных экспериментов для нахождения требуемого количества жгутов для каждой новой схемы армирования. Далее этот вариант не рассматривается, но он может быть осуществлен при необходимости.

В программе рассматриваются пакеты слоев, состоящие из  $N$  наборов слоев со схемой армирования  $[\pm A / \pm B]$ , где  $A$  и  $B$  – некоторые углы армирования. Сочетание двух различных углов позволяет получить больше различных вариантов характеристик материала, чем при использовании одного угла.

На первом этапе в программе вычисляются при помощи теории слоистых композиционных материалов [3, 4] модуль упругости вдоль оси трубы, модуль сдвига в плоскости пакета слоев (для малого участка трубы, который можно считать плоским), КТР в направлении оси трубы. На рис. 1 показаны графики зависимости модуля упругости и модуля сдвига для углепластика КМУ М46J при различных схемах армирования при использовании одного пакета слоев  $[\pm A / \pm B]$ . При использовании кратного количества таких пакетов значения не изменятся.

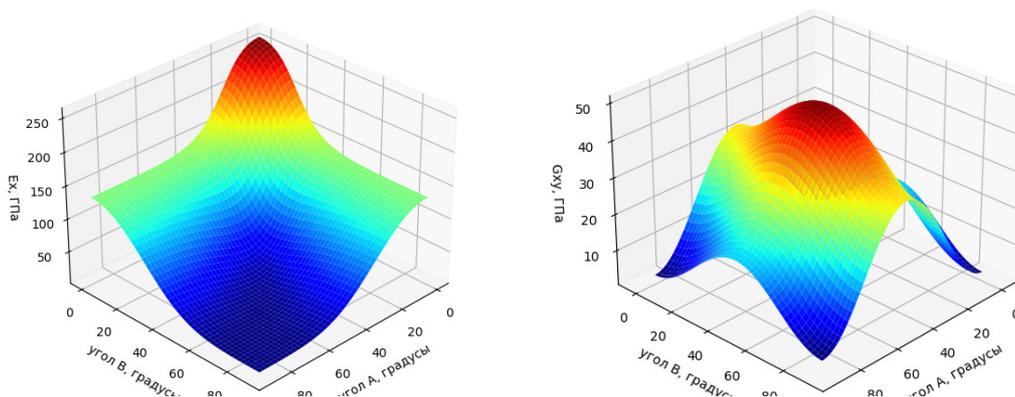


Рис. 1. Графики зависимости модуля упругости и модуля сдвига от схемы армирования

На рис. 2 представлен график зависимости коэффициента температурного расширения (КТР) от схемы армирования и определены схемы, при которых для заданного материала достигается нулевой КТР (при заданной точности нахождения углов).

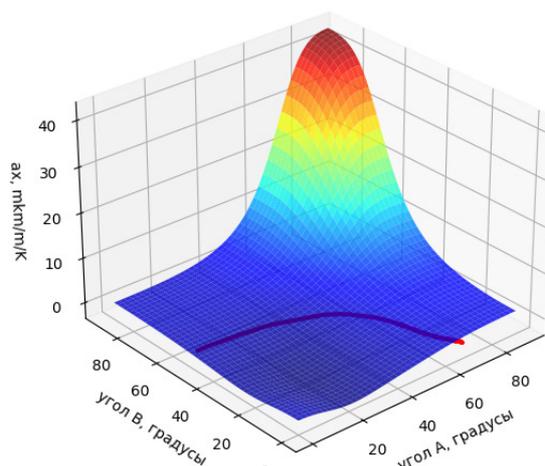


Рис. 2. Зависимость КТР вдоль оси трубы от схемы армирования и линия, соответствующая схемам с нулевым КТР

Для каждой из найденных схем армирования, обеспечивающих нулевой КТР, находится величина модуля упругости вдоль оси трубы и модуль сдвига материала трубы в плоскости слоя. Каждой схеме армирования соответствует толщина повторяющегося пакета слоев  $\delta$ . Далее по формулам (1, 2) для каждой схемы армирования находят требуемые диаметры для удовлетворения требований на изгиб ( $(EJ_{mp})$ ) и на кручение ( $(GJ_{k,mp})$ ) сечения в форме тонкостенного кольца [5]:

$$(EJ)_{\text{тр}} = E \frac{\pi \delta D_{\text{тр}}^3}{8} \rightarrow D_{\text{тр.1}} = \sqrt[3]{\frac{8(EJ)_{\text{тр}}}{E\pi\delta}} \quad (1)$$

$$(GJ_k)_{\text{тр}} = G \frac{\pi \delta D_{\text{тр}}^3}{4} \rightarrow D_{\text{тр.2}} = \sqrt[3]{\frac{4(GJ_k)_{\text{тр}}}{G\pi\delta}} \quad (2)$$

Среди найденных диаметров, находится максимальное значение ( $D_i$ ) в каждой паре  $\{D_{\text{тр.1}}, D_{\text{тр.2}}\}$  соответствующее  $i$ -ой схеме армирования, что гарантирует обеспечение требования как на изгиб, так и на кручение. Выбирается минимальный диаметр из множества найденных вариантов  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ .

В случае, если найденный диаметр больше максимально-допустимого – количество идентичных пакетов слоев увеличивается на 1 и процедура повторяется.

При этом в процессе расчета находится удельный вес сечения (4):

$$M_{\text{уд}} = \pi D \delta \rho \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала.

В случае, если при диаметре, удовлетворяющем требованию, удельный вес сечения превышает предельно допустимый – можно сделать вывод, что при заданных требованиях к жесткости добиться заданной массы при обеспечении околонулевого КТР нельзя.

По итогам работы программы выдаются диаметр и толщина сечения, схема армирования, фактические характеристики материала трубы и фактические жесткости.

Следует отметить, что выбранная схема армирования должна также удовлетворять критерию прочности. В случае, если имеется запас по диаметру и/или массе может потребоваться увеличение толщины слоя или выбор другой схемы армирования, не рациональной с точки зрения минимальной массы.

#### Библиографические ссылки

1. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учебное пособие. А. В. Туманов, В. В. Зеленцов, Г. А. Щеглов. – 3-е изд., испр. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 572 с.
2. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие / М. А. Комков, В. А. Тарасов. М. :Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
3. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. М : Машиностроение, 1990. 512 с.
4. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. Н. А. Алфутов, П. А. Зиновьев, Б. Г. Попов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
5. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.

#### References

1. A. V. Tumanov, V. V. Zelencov, G. A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov : uchebnoe posobie*. [Fundamentals of the layout of the onboard equipment of spacecraft: study guide]. Moscow, MGTU im N. E. Bauman. 2018. 572 p.
2. M. A. Komkov, V. A. Tarasov. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstrukcij raket i sredstv porazheniya : ucheb. Posobie*. [Technology of winding composite structures of missiles and weapons: study guide]. Moscow, MGTU im N. E. Bauman. 2011. 431 p.
3. V. V. Vasilyev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin and other. *Kompozicionnye materialy: spravochnik*. [Composite materials: handbook]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1990. 512 p.
4. N. A. Alfutov, P. A. Zinovyev, B. G. Popov. *Raschet mnogoslojnyh plastin i obolochek iz kompozicionnyh materialov*. [Calculation of multilayer plates and shells made of composite materials]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1984. 264 p.
5. G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. Matveev. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. [Handbook of the resistance of materials]. Kiev, *Nauk. dumka*, 1988. 736 p.

УДК 62-83:629.782.06

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С. В. Покудин, Д. В. Бабушкина

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск, ул. Кирова, 12а  
АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 52  
E-mail: pokudin-00@mail.ru

*В статье представлена математическая модель электропривода блока механического системы ориентации панелей солнечных батарей, а также разработан электропривод для системы ориентации солнечной батареи космического аппарата.*

*Ключевые слова: космический аппарат, система ориентации, солнечная батарея, электропривод.*

## DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC DRIVE FOR THE ORIENTATION SYSTEM OF A SOLAR PANEL OF A SPACE VEHICLE

S. V. Pokudin, D. V. Babushkina

Siberian Federal University  
12a, Kirova Str., Zheleznogorsk, 662971, Russian Federation  
JSC "Information Satellite Systems" named after Academician M. F. Reshetnev  
52, Lenina Str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation  
E-mail: pokudin-00@mail.ru

*The article presents a mathematical model of the electric drive of the block of the mechanical orientation system of solar panels, and also developed an electric drive for the orientation system of the solar battery of the spacecraft.*

*Keywords: spacecraft, orientation system, solar battery, electric drive*

### **Сокращения, используемые в статье**

СЭП – система электропитания

КА – космический аппарат;

БМ – блок механический;

СОСБ – система ориентации солнечной батареи;

СБ – панели солнечных батарей;

БВТ – Бесконтактный вращающийся трансформатор.

В феврале 1994 г. в интервью газете «Мегаполис-Экспресс» академик М. Ф. Решетнев отмечал, что во всем мире заметна тенденция к использованию малых низкоорбитальных спутников связи. Это объясняется, во-первых, их невысокой стоимостью, во-вторых, тем, что при наличии таких спутников потребитель будет пользоваться простыми, дешевыми терминалами [1].

Появление спутников связи и их активное распространение обуславливается тем фактом, что при удалении абонентов связи на расстояние более 500 км становится экономически выгоднее космическая связь по сравнению с кабельными и радиорелейными линиями связи. Применение спутников связи позволяет охватить радиосвязью огромные районы площадью в миллионы квадратных километров.

Технологии спутниковой координатной навигации применяются в быту, различных технических системах, науке и образовании, в экономике, геодезии и картографии, транспортной отрасли, включая морское и речное судоходство, воздушный и наземный транспорт, и т. п. Порядка 80 % навигационного оборудования применяется на автомобильном транспорте. При помощи ГЛОНАСС отслеживается местоположение и передвижение групп пожарных.

Спутниковая навигация используется в определении местоположения географических объектов с точностью в несколько сантиметров при прокладке нефте- и газопроводов, линий электропередач, для уточнения параметров местности при возведении зданий и сооружений, дорожном строительстве.

По оценкам отечественных и зарубежных экспертов, применение ГЛОНАСС повышает эффективность строительных и кадастровых работ на 30-40 % [2].

Увеличение количества и качества полезных функций спутников влечет за собой повышение требований к мощности спутника, а именно к мощности системы электропитания для обеспечения электроэнергией более мощных модулей полезной нагрузки КА (антенны различного назначения). Это достигается как увеличением размеров солнечных панелей, так и увеличением их эффективности. Одним из методов улучшения КПД солнечных панелей является совершенствование системы ориентации солнечных батарей КА.

#### Назначение СОСБ в космических аппаратах

Создание систем электропитания – одна из главных задач проектирования космических аппаратов. В СЭП также входят солнечные батареи – источник энергии, несущие конструкции СБ, система разворачивания СБ, датчики ориентации СБ и привода ориентации СБ. Привод (электродвигатель) необходим, чтобы солнечную панель можно было ориентировать на солнце при движении аппарата по орбите. Эффективное получение солнечной энергии при помощи высокоточного наведения солнечных панелей позволяет развивать большую мощность, что позволяет как расширить функционал космического аппарата, так и увеличить радиус действия аппаратуры полезной нагрузки (антенны связи).

Ориентируемые панели солнечных батарей применяются на всех современных космических аппаратах: Радуга, Экран, Горизонт, Поток, Луч, Галс, Экспресс, SESAT, Меридиан, ГЛОНАСС.

Кроме того, СОСБ КА обеспечивают приведение батарей в транспортировочное состояние и автоматическое их раскрытие в рабочее положение перед началом летной эксплуатации.

#### СОСБ выполняет следующие функции:

- установку и закрепление в сложенном положении под обтекателем ракеты космического назначения панелей СБ
- освобождение панелей СБ в процессе подготовки для использования по назначению
- приведение панелей СБ в рабочее положение (раскрытие) и фиксация в нем.
- ориентация панелей СБ перпендикулярно направлению падения солнечных лучей.

Для технических систем, от которых требуется длительное автономное функционирование, такие свойства как самодиагностика, коррекция работы системы по ее результатам, а также парирование неисправностей являются необходимыми. Одной из таких систем является система ориентации солнечной батареи (СОСБ).

Преимущественно используются алгоритмы взаимодействия с СОСБ космического аппарата (КА), которые обеспечивают следующие режимы работы:

- автоматический, реализуемый алгоритмами, заложенными в бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ);
- по командам управления, формируемым из наземного комплекса управления (НКУ) [3].

#### Моделирование работы привода СОСБ КА

Спроектированная в программной среде MATLAB Simulink схема управления боковым приводом представлена ниже (рис. 1).

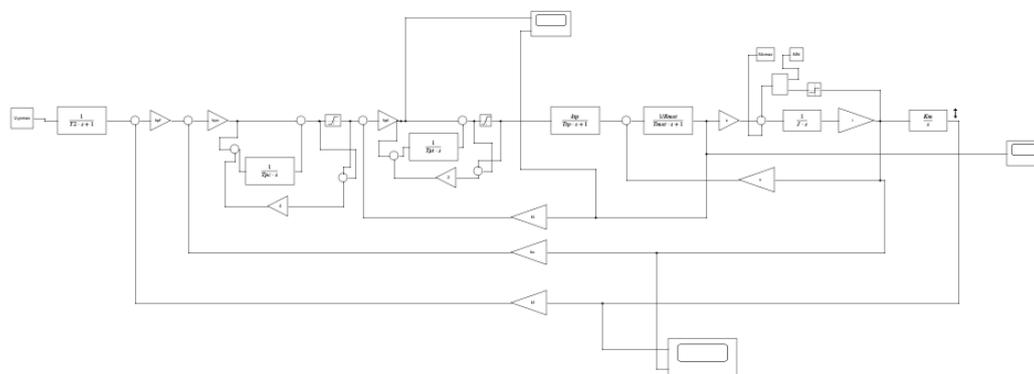


Рис. 1. Имитационная модель электропривода СОСБ

В результате моделирования пуска двигателя под нагрузкой получили следующие графики. С блока, имитирующего работу датчика углового положения на блок управления двигателем поступает информация о угловом положении и скорости вращения выходного вала привода БМ СОСБ (рис. 2).

С блока, имитирующего датчик тока получаем график величины тока якоря двигателя (рис. 3).

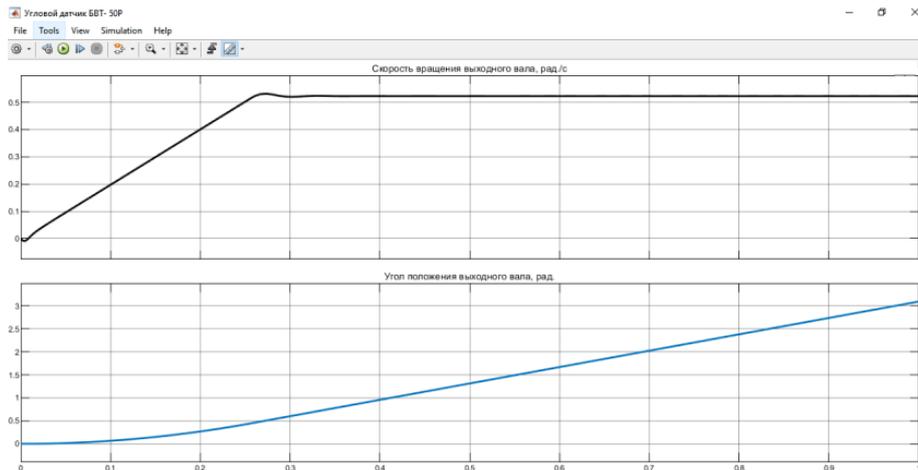


Рис. 2. График скорости вращения и углового положения выходного вала БМ СОСБ

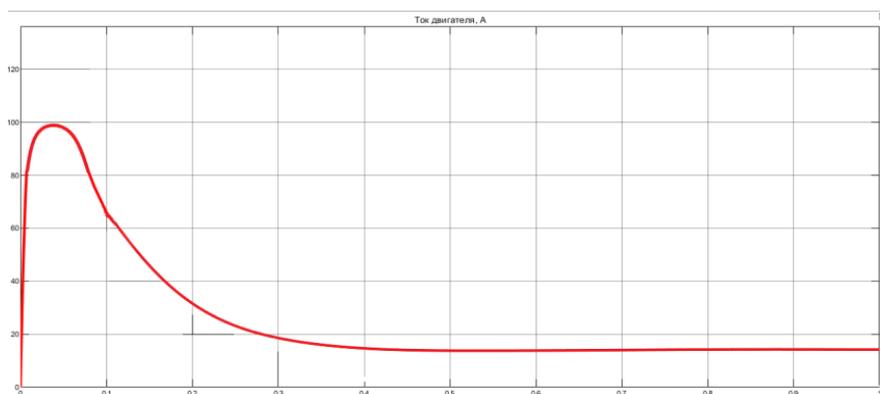


Рис. 3. График тока двигателя

Информация о положении выходного вала и его скорость вращения снимается с углового датчика и поступает в блок управления двигателем. В качестве углового датчика был выбран бесконтактный вращающийся трансформатор.

Данная математическая имитационная модель электропривода БМ СОСБ КА предназначена для симуляции работы электродвигателя для изучения и анализа процесса управления угловым положением солнечных панелей КА. Создание модели управления двигателем служит основой для разработки и реализации системы ориентации солнечных батарей космического аппарата.

#### Библиографические ссылки

1. Актуальность малых космических аппаратов – <https://cyberleninka.ru/article/n/nazemnyy-kompleks-upravleniya-dlya-malyh-kosmicheskikh-apparatov>
2. Применение технологий ГЛОНАСС: <https://www.roscosmos.ru/21957/>
3. Назначение СОСБ 16342.pdf (infokosmo.ru)

#### References

1. The relevance of small spacecraft <https://cyberleninka.ru/article/n/nazemnyy-kompleks-upravleniya-dlya-malyh-kosmicheskikh-apparatov>
2. V.L. Goldin, E.M. Kurbatov, E.M. Yamashev DEVICES FOR ROTATING SOLAR PANELS OF SPACECRAFT
3. SAOS (solar array orientation system) appointment 16342.pdf (infokosmo.ru)

УДК 629.78

## О НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю. П. Похабов

ОАО «НПО ПМ МКБ»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 55а

E-mail: pokhabov\_yury@mail.ru

*Рассматриваются проблемы обеспечения надёжности раскрытия трансформируемых конструкций космических аппаратов в свете стандартизации задач проектирования.*

*Ключевые слова: надёжность, коэффициенты безопасности, запасы прочности, запасы движущих моментов (сил), космические аппараты.*

## ON THE RELIABILITY OF TRANSFORMABLE STRUCTURES

Yu. P. Pokhabov

JSC "NPO PM Small Design Bureau"

55a, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

E-mail: pokhabov\_yury@mail.ru

*The problems of ensuring the reliability of the deployment of transformable spacecraft structures are considered in the light of the standardization of design tasks.*

*Keywords: reliability, reserve factor, margin of safety, torque (force) margin, spacecrafts.*

За последние 10 лет проведения Решетневских чтений специалисты АО «ИСС» ни разу не поднимали вопросы совершенствования методологии обеспечения надёжности крупногабаритных трансформируемых механических систем [1]. Что это может значить? Поверить в то, что АО «ИСС» не занимается совершенствованием методологии надёжности невозможно, ведь никому же не придет в голову создавать, например крупногабаритные антенны только для того, чтобы они не раскрывались на орбите, или не обеспечили требуемую точность позиционирования в течение срока активного существования. Тогда этому может быть только одно разумное объяснение: все методологические разработки в АО «ИСС», касающиеся вопросов надёжности трансформируемых конструкций переведены в область конфиденциальности.

Такое объяснение способно объяснить некоторые странности.

1. С 1975 г. по настоящее время в США выпущено три редакции военных стандартов, посвященных проектированию подвижных механических узлов, две редакции стандартов NASA и один стандарт авиации и аэронавтики (AIAA). За то же время в СССР разработан только один, всеми забытый ОСТ 92-4339–80, в России не появилось ни одного стандарта по проектированию раскрывающихся конструкций.

2. Использование коэффициентов безопасности и запасов прочности играет ключевую роль в обеспечении прочности КА, а их значения нормируются соответствующими стандартами. Для механизмов трансформируемых конструкций аналогичную роль играют запасы движущих моментов (сил), однако российских стандартов, устанавливающих их нормативные значения, до сих пор не существует [2].

3. Еще в 2005 году в одной из книг генерального директора АО «ИСС» прозвучал вывод об отсутствии методик, позволяющих учитывать влияние технологических и производственных работ на надёжность трансформируемых конструкций, но о решении этой проблемы до сих пор ничего не известно [3].

4. Переход на цифровые технологии проектирования требует разработки новой (четвертой) прикладной теории современной теории надёжности, основанной на инженерных дисциплинах и конст-

рукторско-технологических способах обеспечения качества и надежности, однако публичных сообщений о достижении АО «ИСС» в этой области нет [4].

5. В последние годы появилось требование по обеспечению вероятности безотказной работы крупногабаритных антенн в течение срока активного существования. Речь идет о точностной и жесткой надежности, но такие термины до сих пор еще не введены в научный оборот [5].

Надежность – это то с чем не шутят и просто так не делятся секретами, но за последние годы «за воротами» АО «ИСС» появились новые подходы к надежности трансформируемых конструкций, готовых к внедрению [2]. Возможно «доморощенные» и сторонние разработки методов обеспечения надежности позволят получить синергетический эффект, но АО «ИСС» пока не спешит к сотрудничеству.

### Библиографические ссылки

1. Похабов Ю.П. Проблемы обеспечения надёжности раскрытия трансформируемых конструкций // Решетнёвские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. (8–11 нояб. 2017, Красноярск). Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 162–163.
2. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания: монография. Красноярск: СФУ, 2018. 340 с.
3. Тестоедов Н.А., Михнёв М.М., Михеев А.Е. и др. Технология производства космических аппаратов. Красноярск: СибГАУ, 2009. 349 с.
4. Pokhabov Yu.P. Dependability in digital technology. *Dependability*. 2020; 20(2): 3–11.
5. Похабов Ю.П. О точностной надёжности // Решетнёвские чтения: материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. (10–12 нояб. 2021, Красноярск). Красноярск, 2021. Ч. 1. С. 123–124.

### References

1. Pokhabov Yu.P. [Problems of ensuring reliability of disclosure of transformable structures]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials IX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, V. 1. P. 162–163 (In Russ.).
2. Pokhabov Yu.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo srbatyvaniya* [Theory and practice of ensuring the reliability of mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2018. 338 p.
3. Testoedov N.A., Mikhnev M.M., Mikheev A.E. et al. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Technology for the production of spacecraft]. Krasnoyarsk: SibGAU Publ., 2009. 349 p.
4. Pokhabov Yu.P. Dependability in digital technology. *Dependability*. 2020; 20(2): 3–11.
5. Pokhabov Yu.P. [About reliability for accurate]. *Materialy XXV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials IX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2021, V. 1. P. 123–124 (In Russ.).

© Похабов Ю. П., 2022

УДК 620.175.24

## ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ НА ГРАНИЦЕ «ВОЛОКНО-МАТРИЦА» ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА\*

О. В. Семенуха<sup>1,3\*</sup>, И. И. Бриль<sup>2</sup>, С. Ю. Воронина<sup>3</sup>

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

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30

<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: semenukha.cool@mail.ru

*В работе рассматривается изменение адгезионной прочности образцов композиционного материала, состоящего из силикона и углеткани, который может использоваться в качестве мембранной оболочки рефлектора космического аппарата. Для активации поверхности применяется 3-аминопропилтриэтоксисилан (АПТЭС).*

*Ключевые слова: адгезионная прочность, полимерный композиционный материал, мембранная оболочка, активатор поверхности, адгезия.*

## INCREASE OF ADHESIVE POWER AT THE FIBER-MATRIX INTERFACE OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL

O. V. Semenukha<sup>1,3\*</sup>, I. I. Bril<sup>2</sup>, S. Yu. Voronina<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>National Reseach Tomsk Polytechnic University  
30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

\*E-mail: semenukha.cool@mail.ru

*The paper considers the change in the adhesive power of samples of a composite material consisting of silicone and carbon fiber, which can be used as a membrane shell of a spacecraft reflector. 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) is used to activate the surface.*

*Keywords: adhesive power, polymer composite material, membrane shell, surface activator, adhesion.*

Введение. Углеродная ткань, как основа гибкой и электропроводящей мембранной оболочки, активно используется для армирования композиционного материала. Однако после отверждения силикон в качестве матрицы обладал низкой адгезией к углеродной ткани, использованной в качестве армирующего наполнителя.

Целью данной работы является определение оптимальных концентраций АПТЭС для получения высокой прочности при склеивании углеткани. Полученные результаты можно использовать при

---

\* 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).

склеивании конструктивных элементов космических аппаратов. Исследования проводились на паре «Волокно – Матрица». В качестве связующего использован двухкомпонентный оптически прозрачный силикон аддитивной системы отверждения, отверждаемый при комнатной температуре.

Согласно [1,2] адгезия связующего к волокну обусловлена наличием на поверхности волокна и в структуре полимерной цепи связующего функциональных групп, способных к химическому взаимодействию, а также степенью конверсии реакционноспособных групп адгезива. Эффективным способом увеличения адгезионной прочности является аппретирование волокна [3] для того, чтобы увеличить число полярных групп на его поверхности, способных если не к химическому, то к взаимодействию с полимерным адгезивом за счет межмолекулярных сил притяжения. В большинстве случаев углеродные ткани обработаны эпоксидными аппретатами, которые не имеют в своем составе функциональных групп, позволяющих химически или физически взаимодействовать с кремнийорганическими матрицами. Для лучшего адгезионного взаимодействия между углеродным волокном и кремнийорганическим связующим необходимо использование силановых аппретов [4]. Однако использование силановых аппретов для углеродных тканей не распространено из-за высокой инертности углеродного волокна к подобным химическим соединениям.

Учитывая вышеизложенное, решением данной проблемы может стать химическая функционализация аппретов углеродных тканей такими заместителями, которые способны создавать с кремнийорганическими матрицам прочную сшитую структуру. Нами были подготовлены образцы с концентрацией раствора АПТЭС 0,5 %, 1 %, 2 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20%, 25%, 30%, 35%. Механическое испытание адгезионной прочности проводилось не менее чем через 24 часа после склеивания [5] в условиях квазистатического нагружения на универсальной испытательной машине (Eurotest T-50, S.A.E. IBERTEST, Испания).

Нагрузка создавалась с постоянной скоростью 5 мм/мин. Для обеспечения статической надежности подготавливали серию из 5 образцов для каждой выбранной концентрации раствора АПТЭСа для обработки поверхности углеткани. Образцы для испытания адгезионной прочности схематично изображено на рисунке.

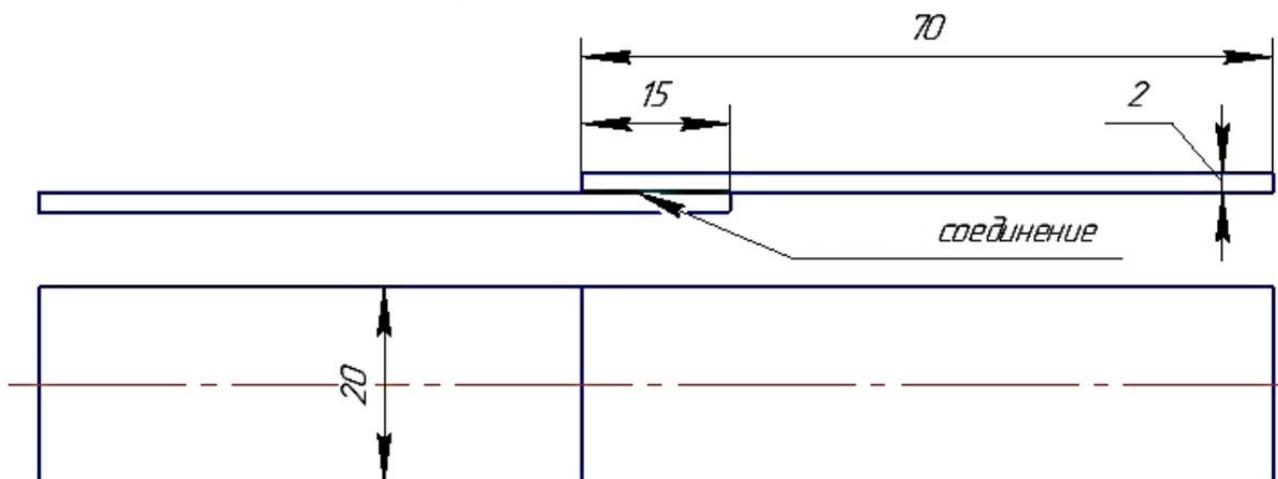


Схема соединения образцов для испытания композита на адгезионную прочность

По результатам эксперимента установлено, что с увеличением концентрации раствора АПТЭСа, адгезионная прочность соединения «Волокно – Матрица» повышается. Зафиксировано увеличение в два раза данного показателя по сравнению с исходным образцом. Это свидетельствует о том, что раствор АПТЭСА целесообразно использовать в качестве активатора адгезии углеволокна при создании полимерных композиционных материалов на основе кремнеорганического связующего.

#### Библиографические ссылки

1. Определение поверхностных свойств углеволокна в процессе контактного взаимодействия с полимерными связующими / С. Ю. Воронина, Власов А. Ю., Ворончихин В. Д. и др. // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. №. 8. С. 1148-1153.

2. Горенберг А. Я., Горбаткина Ю. А., Иванова-Мумжиева В. Г. Изучение адгезии к волокнам со сложным рельефом поверхности на примере углеродных волокон // Полимеры 2020. 2020. С. 99-101.
3. Сидорина А. И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. №. 4 (110). С. 61-74.
4. Nanometer surface roughness increases select osteoblast adhesion on carbon nanofiber compacts / R. L. Price, Ellison K., Haberstroh K. M., Webster T. J. Price R. L. et al. // Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials. 2004. Т. 70. №. 1. P. 129-138.
5. ОСТ 92-1477-78. Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания клеевых соединений на сдвиг. 11 с.

### References

1. Determining the surface properties of carbon fiber in contact interaction with polymeric binders / S. Yu. Voronina, Vlasov A. Yu., Voronchikhin V. D et al. // Zhurnal prikladnoi khimii. 2018. Vol. 91. №. 8. P. 1148-1153.
2. Gorenberg A. Ya., Gorbatkina Yu. A., Ivanova-Mumzhiyeva V. G. Izuchenie adgezii k voloknam so slozhnym rel'efom poverhnosti na primere uglerodnykh volokon // Polimery 2020. 2020. P. 99-101.
3. Sidorina A. I. Moditsikatsiya poverkhnosti uglerodnykh armiruyushchikh napolnitelei dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov ehlektrokhimicheskoi obrabotkoi (obzor) // Trudy VIAM. 2022. №. 4 (110). P. 61-74.
4. Nanometer surface roughness increases select osteoblast adhesion on carbon nanofiber compacts / R. L. Price, Ellison K., Haberstroh K. M., Webster T. J. Price R. L. et al. // Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials. 2004. Т. 70. №. 1. P. 129-138.
5. ОСТ 92-1477-78. Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания клеевых соединений на сдвиг. P. 11.

© Семенуха О. В., Бриль И. И., Воронина С. Ю., 2022

УДК 681.3:536.24.08

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ИСПАРИТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ**

А. В. Серяков, Анд. П. Алексеев

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»,  
 Российская Федерация, 173003, г. Великий Новгород, ул. Санкт-Петербургская, 64  
 E-mail: seryakovav@yandex.ru

*Представлены результаты исследований путем решения обратной задачи теплопроводности теплоемкости испарителя коротких линейных тепловых труб (ТТ) с выполненным в виде сопла Лаваля паровым каналом и предназначенных для охлаждения космических аппаратов и спутников с ядерными энергетическими установками и с регламентацией взлетной массы.*

*Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, теплоемкость испарителя, тепловое сопротивление ТТ.*

**NUMERICAL STUDIES OF THE HEAT PIPE'S EVAPORATORS OPERATION**

A. V. Seryakov, Andr. P. Alekseev

LLC «RUDETRANSSERVICE»  
 64, St. Petersburg Str., Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation  
 E-mail: seryakovav@yandex.ru

*The results of studies by solving the inverse thermal conductivity problem the heat capacity of short linear heat pipes (HP's evaporator) with a Laval nozzle - liked vapour channel and intended for cooling spacecraft and satellites with strict take-off mass regulation are presented.*

*Keywords: inverse thermal conductivity problem (ITCP), evaporator heat capacity, thermal resistance of the short linear heat pipes (SLHP).*

Вопросы повышения эффективности и увеличения коэффициента теплопередачи коротких низкотемпературных ТТ, предназначенных для охлаждения теплонапряженных конструкций космических аппаратов и спутников с жесткой регламентацией взлетной массы представляет собой большой практический интерес. Применение коротких линейных ТТ оправдано в случае конструктивной невозможности размещения контурных ТТ а также для повышения долговременной устойчивости и надежности систем охлаждения, в которых отсутствуют распределенные подводящие и отводящие линии контурных ТТ.

Для исследования теплового сопротивления  $R_{ТТ}$  и теплоемкости  $C_{ТТ}$ , характеризующих внутренние свойства, были применены короткие ТТ с выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лаваля паровым каналом, подробное описание которых было дано ранее [1-2]. Распределение одномерного температурного поля  $t(\bar{z}, \tau)$  для ТТ в вакуумном адиабатическом калориметре применяют для решения стандартного уравнения теплопроводности:

$$q_{ev}(\bar{z}, \tau) = \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \frac{1}{R_{ТТ}(t)} \frac{\partial t(\bar{z}, \tau)}{\partial \bar{z}} = C_{ТТ}(t) \dot{t}(\bar{z}, \tau);$$

$$R_{ТТ}(t) = \frac{L_{ТТ}}{\lambda(t)F(\bar{z})_{ev}}, \frac{K}{W}; C_{ТТ}(t) = \rho_{ТТ} c_p(t) L_{ТТ} F(\bar{z}), \frac{J}{K}, \quad (1)$$

где  $R_{ТТ}(t)$  –тепловое сопротивление ТТ, K/W;  $C_{ТТ}(t)$  – теплоемкость ТТ, J/K;  $c_p(t)$  – удельная теплоемкость ТТ, J/kg·K;  $\rho_{ТТ}$  – плотность ТТ, kg/m<sup>3</sup>;  $L_{ТТ}$  –длина ТТ, m;  $F(\bar{z})$  – площадь поперечного сечения

ТТ,  $m^2$ ;  $L_{ТТ}$  – полная длина ТТ, толщина испарителя =  $0.035 \cdot L_{ТТ}$ ;  $\bar{z} = z/L_{ТТ}$  – безразмерная координата;  $\lambda(t)$  – коэффициент теплопроводности ТТ,  $W/m \cdot K$ ;  $\dot{t}$  – скорость роста температуры,  $K/s$ .

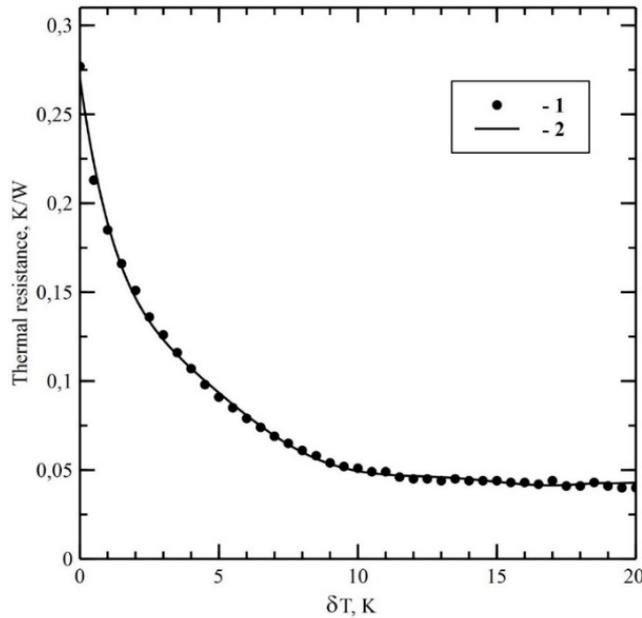


Рис. 1. Тепловое сопротивление  $R_{ТТ}$ , зависящее от перегрева испарителя  $\delta t = T_{ev} - T_B$  относительно температуры кипения диэтилового эфира при атмосферном давлении:

- 1 – точки, экспериментальные стационарные значения  $R_{ТТ}$  коротких ТТ;
- 2 – сплошная линия, экспериментальные значения  $R_{ТТ}$  той же ТТ, при линейном нагреве со скоростью  $3 \cdot 10^{-3} K/s$

Из анализа рис. 1 тепловая мощность испарителя  $q_{ev}$  может быть записана в следующем виде [3-5]:

$$\bar{z} C_{ТТк}(t) \dot{t} + \frac{\partial q(\bar{z}, \tau_k)}{\partial \bar{z}} = 0, q_{ev}(\bar{z}, \tau_k) = -z \frac{L_{ТТ}}{R_{ТТ} F(\bar{z})} \frac{\partial t(\bar{z}, \tau)}{\partial \bar{z}};$$

$$q_{ev}(\bar{z} = 0.035, \tau_k) = -0.035 \frac{L_{ТТ}^2}{R_{ТТ} F(\bar{z})} \left. \frac{\partial t(\bar{z}, \tau)}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{z}=0.035} \quad (2)$$

На рис. 2 показано температурное поле вертикально ориентированной ТТ при монотонном и линейном во времени нагреве снизу

Уравнение (1) распространения теплового потока  $q_{ev}(\bar{z}, \tau_k)$  вдоль оси  $z$  может быть разделено и представлено в виде системы двух уравнений, левая часть (2), для расчета теплоемкости  $C_{ТТк}(t)$  и теплового потока  $q_{ev}(\bar{z}, \tau_k)$ , величина которых связана с тепловым сопротивлением  $R_{ТТ}$  в момент времени  $\tau_k$ . Решение уравнения (3) для испарителя с кипящим диэтиловым эфиром было проведено итерационным методом, с определением функционала расхождения между левой и правой частями уравнения (3) и его минимизации с помощью метода сопряженных градиентов с известной функцией теплового сопротивления  $R_{ТТ}(t)$ .

Результаты приведены на рис. 3, погрешность восстановления теплоемкости  $C_{evk}(t)$  3.5 %.

$$\int_0^{0.035} \bar{z} C_{evk}(t) \dot{t}(\bar{z}, \tau_k) d\bar{z} = 0.035 q_{ev}(\bar{z}, \tau_k);$$

$$\sum_k \delta C_{evk}(t) = \frac{1}{2} \sum_k \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \left[ \int_0^{0.035} \bar{z} C_{evk}(t) \dot{t}(\bar{z}, \tau_k) d\bar{z} - 0.035 q_{ev}(\tau_k) \right]^2 d\tau. \quad (3)$$

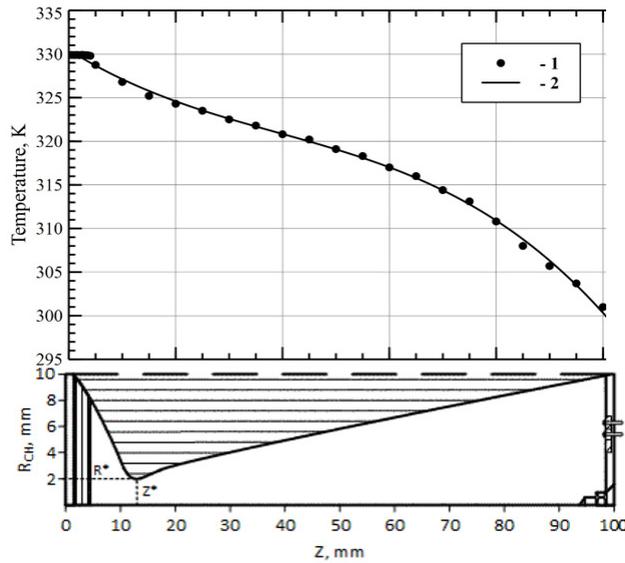


Рис. 2. Экспериментальные значения температуры поверхности ТТ вдоль образующей и расчетные значения температуры пара диэтилового эфира внутри образованного парового канала, подобного соплу Лавалья: 1 – черные точки, экспериментальные значения температуры поверхности ТТ  $T_{\text{sur}}$  с паровым каналом, выполненным в форме сопла Лавалья, К; 2 – сплошная кривая, расчетные значения температуры  $T$ , К, в сопле Лавалья, сформированном паровом канале ТТ. В нижней части показана половина поперечного сечения парового канала вдоль продольной оси  $Oz$

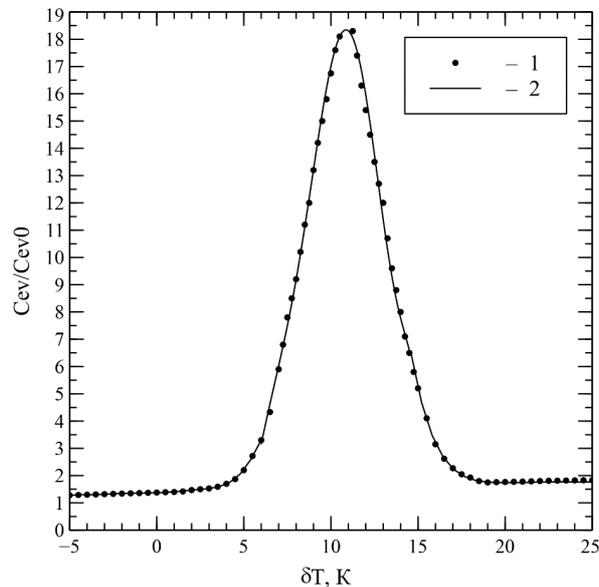


Рис. 3. Расчетное значение теплоемкости испарителя ТТ  $C_{ev} / C_{ev0}$ :  $C_{ev}$  – теплоемкость насыщенного диэтиловым эфиром испарителя, Дж/К;  $C_{ev0}$  – теплоемкость испарителя опорной ТТ, заполненного осушенным воздухом, Дж/К; 1 – черные точки, значения относительной теплоемкости нижнего фрагмента короткой ТТ (фрагмента испарителя) с выполненным в виде сопла Лавалья паровым каналом, полученные путем решения обратной задачи теплопроводности с шагом по температуре  $0.5 \text{ K } \delta t = T_{ev} - T_B$ , при начинающемся процессе кипения диэтилового эфира; 2 – полином десятой степени для сглаживания полученных точек теплоемкости испарителя

Используя опытные значения теплового сопротивления  $R_{ТТ}(\delta t)$ , представленные в виде полинома пятой степени величины перегрева испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира при атмосферном давлении  $\delta t = T_{ev} - T_B$ , удастся провести вычисления теплоемкости нижнего фрагмента, включая испаритель ТТ (см. рис. 2).

Энтальпия испарения работающего испарителя с кипящим диэтиловым эфиром может быть оценена по уравнению (4), левая часть, эффективная теплоемкость линейно нагреваемого капиллярно-пористого испарителя ТТ в начале кипения эфира по правой части уравнения:

$$C_{ev} = \frac{H_{ev}}{\dot{t}} = \frac{\left(345 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 11\text{K} + 2.34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 16\text{K}\right) 1.57 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{3 \cdot 10^{-3} \text{K/s}} = 21.02 \frac{\text{kJ}}{\text{K}};$$

$$\frac{C_{ev}}{C_{evo}} = \frac{C_{evo} + H_{ev}/\dot{t}}{C_{evo}} = 1 + \frac{H_{ev}/\dot{t}}{C_{evo}} = 18.5. \quad (4)$$

что очень близко к максимальному численному значению теплоемкости испарителя ТТ.

### Библиографические ссылки

1. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: Энергия. 1973. 144 с.
2. Seryakov A.V., Alekseev A.P. A Study of the Short Heat Pipes by the Monotonic Heating Method // Journal of Physics: Conference Series. 2020. v. **1683** 022051.
3. Seryakov A.V. Numerical modeling of the vapour vortex // Journal of the high energy physics, gravitation 2019, N5, pp.218-234.
4. Seryakov A.V. Computer modeling of the vapour vortex orientation changes in the short low temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer 2019 v.140. pp. 243-259.
5. Seryakov A.V. Intensification of heat transfer processes in the low temperature short heat pipes with Laval nozzle formed vapour channel//American Journal of Modern Physics v.7, № 1, pp. 48-61, 2018.

### References

1. Platunov E.S. Teplofizicheskie izmereniya v monotonnom rezhime. L.: Energy. 1973.144 p.
2. Seryakov A.V., Alekseev A.P. A Study of the Short Heat Pipes by the Monotonic Heating Method // Journal of Physics: Conference Series. 2020. v. **1683** 022051.
3. Seryakov A.V. Numerical modeling of the vapour vortex // Journal of the high energy physics, gravitation 2019, N5, pp.218-234.
4. Seryakov A.V. Computer modeling of the vapour vortex orientation changes in the short low temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer 2019 v.140. pp. 243-259.
5. Seryakov A.V. Intensification of heat transfer processes in the low temperature short heat pipes with Laval nozzle formed vapour channel//American Journal of Modern Physics v.7, № 1, pp. 48-61, 2018.

© Серяков А. В., Алексеев Анд. П., 2022

УДК 67.02; 62-1/9

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА БЕСКОРПУСНОГО ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. Р. Сыпачев\*, А. С. Зыков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: vadavada1303@mail.ru

*Описана основная задача, выполняемая гибридным шаговым двигателем, для узлов наведения космического аппарата. Рассмотрен основной габаритный параметр – воздушный зазор. Представлена новая технология контроля воздушного зазора двигателя на базе ранее разработанных методик контроля воздушного зазора.*

*Ключевые слова: гибридный шаговый двигатель, координатно-измерительная машина, воздушный зазор, электромеханический модуль, блок механический.*

## INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE AIR GAP OF A SPACE VEHICLE'S HULL-LESS HYBRID STEPPER MOTOR

V. R. Sypacev\*, A. S. Zykov

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: vadavada1303@mail.ru

*The main task performed by a hybrid stepper motor for the guidance nodes of the spacecraft is described. The main dimensional parameter – the air gap – is considered. A new engine air gap control technology based on previously developed air gap control techniques is presented.*

*Keywords: hybrid stepper motor, coordinate measuring machine, air gap, electromechanical module, mechanical block.*

Основной задачей гибридного шагового двигателя (ГШД) является приведение в движение кинематической составляющей узлов наведения. Рассмотрим принцип работы ГШД на примере блока механического (БМ) системы наведения антенн (СНА). БМ СНА входит в систему антенно-фидерного устройства (АФУ) космического аппарата (КА), для полноценного функционирования которой необходимо высокоточное управление поворотом антенн в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [2]. За точность поворота антенны в каждой из плоскостей отвечает электромеханический модуль (ЭММ). Оси выходных валов ЭММ расположены взаимно перпендикулярно друг к другу.

В ЭММ располагается ГШД, который приводит кинематическую пару привода, представляющую собой волновую зубчатую передачу (ВЗП), в движение. ВЗП работает в определенном диапазоне частот, при которых ГШД должен развивать момент не менее определенного минимума. В обратном же случае при функционировании узла возникнет дефект, который приведет к ремонту изделия.

Момент развиваемый ГШД напрямую зависит от воздушного зазора (ВЗ). Двигатель должен безотказно работать в рабочем диапазоне температур ЭММ, поэтому корректная технология контроля ВЗ может существенно сократить время необходимое на изготовление БМ, так как за частую данное несоответствие обнаруживается при испытаниях ЭММ [4 – 5]. Воздушный зазор возможно контролировать при помощи координатно-измерительной машины (КИМ) [3]. У КИМ есть два метода контроля габаритов изделий: оптический и контактный. Оптический метод контроля наиболее точен, чем контактный, поэтому разработанная методика была разработана под этот способ [1].

### Методика контроля

Контроль ротора:

1) Принять за начало координат внутренний диаметр измеряемого зубчатого венца. Определить центр по 36 точкам с шагом 10°.

2) Измерить от найденного центра радиальное расстояние каждого зубца ротора. Начать замер с зубца, маркированного риской, по часовой стрелке.

3) Перевернуть ротор и повторить замеры. Провести замер радиального расстояния зубцов ротора против часовой стрелки

Контроль статора:

1) Принять за начало координат внешний диаметр статора. Определить центр по 36 точкам с шагом 10°.

2) Измерить от найденного центра радиальное расстояние каждого зубца статора. Начать замер с зубца, маркированного рисккой, по часовой стрелке.

3) Перевернуть ротор и повторить замеры. Провести замер радиального расстояния зубцов статора провести против часовой стрелки.

Часть замеров отображена в таблице. У статора взят один полюс зубьев, у ротора – 10 зубцов. Диапазон ротора радиального размера, принятый за норму с учетом погрешностей КИМ, – 32,990 – 33,007 мм, статора 33,095 – 33,115 мм.

#### Замеры ГШД

Ротор		Статор	
По часовой стрелке	Против часовой стрелки	По часовой стрелке	Против часовой стрелки
32,998	33,003	33,105	33,101
32,997	33,002	33,104	33,099
32,996	33,000	33,104	33,099
32,996	33,000	33,103	33,099
32,996	33,001	33,104	33,100
32,998	33,002	33,104	33,100
32,998	33,002	33,105	33,101
32,997	33,001	33,105	33,101
32,996	33,001	33,106	33,102
32,998	33,003	33,106	33,102

Данная методика позволяет с более высокой точностью проконтролировать основные габаритные параметры ГШД, также существенно упрощается технология контроля по сравнению с контролем габаритов при помощи индикатора часового типа. За счет данной технологии у производства появляется возможность доработки зубьев ГШД по месту, так как несоответствие размеров выявляется по месту контроля ГШД, что последовало существенному уменьшению доработок двигателя после выявления несоответствий во время испытаний ЭММ.

#### Библиографические ссылки

1. The Basics of dimensional Measurement and Measurement instruments [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp> (дата обращения: 20.08.2022).
2. Проектирование блока механического системы наведения антенн / А.А. Пестерников, Черепенников И.А., Харитонов С.Г. и др. // Решетневские чтения, 2011. С. 83-86.
3. Шестиосевые измерительные машины [Электронный ресурс]. URL: [https://lapic.ru/?\\_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsxMTIwNTM1NDs5MjA4OTkzODkwO3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=8521278157941637119](https://lapic.ru/?_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsxMTIwNTM1NDs5MjA4OTkzODkwO3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=8521278157941637119) (дата обращения: 25.08.2022).
4. Каасик П. Ю. Тихоходные безредукторные микроэлектродвигатели. М. : Энергий, 1974. 48 с.
5. Емельянова А. В., Шилин А. Н. Шаговые двигатели. В. : ВолгГТУ, 2005. 16 с.

#### References

1. The Basics of dimensional Measurement and Measurement instruments [Electronic resource]. URL: <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp> (reference: 08/20/2022).
2. Designing a block of a mechanical antenna guidance system / A.A. Pesternikov, I.A. Cherepennikov, S.G. Kharitonov, etc. // Reshetnev Readings, 2011. pp. 83-86.
3. Six-axis measuring machines [Electronic resource]. URL: [https://lapic.ru/?\\_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsxMTIwNTM1NDs5MjA4OTkzODkwO3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=8521278157941637119](https://lapic.ru/?_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsxMTIwNTM1NDs5MjA4OTkzODkwO3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=8521278157941637119) (date of reference: 25.08.2022).
4. Kaasik P.Yu. Low-speed gearless microelectromotors. M. : Energia, 1974. 48 p.
5. Emelyanova A.V., Shilin A.N. Stepper motors. V. : VolgSTU, 2005. 16 p.

УДК 629.32.4

## ШАРНИРНЫЙ УЗЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ\*

А. В. Тоньшина\*, Т. А. Шалыгина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: romasanta9403@gmail.com

*В этой статье рассматриваются конструкционные особенности упруго-деформированного шарнирного узла, состоящего из четырех основных элементов, включая упругую композитную углепластиковую пластину. Применение разработанного шарнира предлагается в составе конструкции корневой части спиц крупногабаритных трансформируемых космических аппаратов.*

*Ключевые слова: шарнирный узел, упругая ламель, упруго-деформируемый шарнир, космические аппараты, плавное раскрытие*

## HINGE ASSEMBLY USING ELASTIC PLATE

A. V. Tonshina\*, T. A. Shalygina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskiirabochiipropekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: romasanta9403@gmail.com

*This article discusses the design features of an elastically deformed hinge assembly, which consists of four main elements, including an elastic composite carbon fiber plate. It is proposed to use the hinge as part of the design of the root part of the spokes of large-sized transformable spacecraft.*

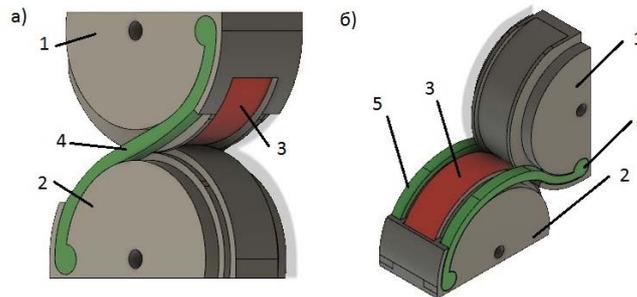
*Keywords: hinge assembly, elastic lamella, elastically deformable hinge, spacecraft, smooth opening*

Шарнирный узел корневой части спиц крупногабаритных трансформируемых конструкций, в основном, применяют с включением электро-механических элементов, отвечающих за плавное закрытие и раскрытие крупногабаритного рефлектора космического аппарата, что приводит к увеличению массы космического аппарата. [1]. На сегодняшний день перспективным является использование гибких шарниров с применением пружинных лент, однако, конструкция таких шарниров, характеризуется особенностями напряженно-деформированного поведения в моменты начала складывания и конца раскрытия. При этом в ленточных пружинах происходят щелчки, приводящие к изменению формы поперечного сечения. [2] Такая технология раскрытия проходит с резкими рывками и не контролируема [3], тем не менее пружинная лента обладает достаточной силой, чтоб привести в движение шарнирную часть, которая удерживает спицу рефлектора [4].

В настоящей работе описана разработанная конструкция упруго-деформированного шарнира (УДШ), которая исключает вышеперечисленные недостатки. На рис. 1 представлена конструкция УДШ, которая включает в себя два сопряженных элемента: подвижного (1) и неподвижного (2). Изменение положения УДШ с рабочего в транспортировочное и обратно, осуществляется путем перемещения подвижного элемента по полукруглой поверхности неподвижного элемента. Конструкция элементов 1 и 2 предусматривает рельсовый ход, что исключает деформации кручения в области соединения этих элементов. Использование в конструкции УДШ элементов 1 и 2 с полукруглыми поверхностями позволяет увеличить рабочий угол перемещения элементов до 180 градусов. Так же стоит отметить, что такую конструкцию можно изготавливать, используя аддитивные технологии 3D-печати (FDM/FFF) [5], сохраняя поверхности и конструкционные особенности после изготовления цифровой модели. Особенностью данного УДШ является интегрирование упругого и интеллектуального элементов в единый конструктив. В УДШ роль генератора упругой движущей силы выполняет пружинная лента (ламель) (3), изготавливаемая из композитного углепластикового материала. При переводе УДШ из рабочего в транспортировочное положение упругая лента деформируется и накапливает упругую механическую энергию. Предотвращение резкого высвобождения накопленной энер-

\* Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

гии осуществляется за счет использования полимерных скоб (4, 5), обладающих эффектом памяти формы, обеспечивающих плавность процесса раскрытия.



Схематическое представление конструкции УДШ в транспортировочном (а) и эксплуатационном (рабочем) (б) положениях

Интеллектуальные скобы выполняют две функции: в стеклообразном состоянии материал имеет достаточную жесткость, чтобы удерживать и фиксировать упругую ленту в напряженно-деформированном состоянии транспортировочного положения, однако, при нагреве от внешних нагревательных элементов материал переходит в высокоэластическое состояние и стремится восстановить свое исходное положение (рабочее положение шарнира), при этом процесс протекает плавно, а значит и сопротивление упругой ленты уменьшается также плавно.

Таким образом преимущество разработанного конструктивного решения УДШ заключается в возможности интегрирования двух материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами и выполняющих различные функции в один шарнирный элемент, что обеспечивает плавность процесса раскрытия.

#### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488с.
2. Н.Н. Голдобин, А.М. Сапегин, Расчет упругого складывания стальной ленточной пружины гибкого шарнира : Решетневские чтения материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2021. 71-72 с.
3. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (ч. 1) // Вестник СибГАУ. 2007. No 2. 78–81 с.
4. Nojima T. Origami modeling of functional structures based on organic patterns // Master's thesis, Graduate School of Kyoto University, Kyoto, Japan, 2002.
5. Kokkonen Petteri. Design guide for additive manu-facturing of metal components by SLM process. Leevi Salonen. 148 p.

#### References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proekti-rovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya: ucheb. posobiye*. [Design basics of the communication spacecrafts] / Sib. gos. aérokosmich. un-t Krasnoyarsk, 2014. 488 p.
2. N.N. Goldobin, A.M. Sapegin, *Raschot uprygogo skladyvaniya stalnoy lentochnoy pryzhiny gibkogo sharnira* [Calculation of elastic folding of a steel band spring of a flexible hinge]: Reshetnevskiy chteniya materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva. V 2-kh chastyakh. Pod obshchey redaktsiyey YU.YU. Loginova. Krasnoyarsk, 2021. 71-72 p.
3. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. *Obzor konstrukcii covremennykh transformiruemykh kosmicheskikh antenn (ch. 1)* [The review of designs of modern transformed space antennas (P. 1)] // Vestnik SibGAU. 2007. No 2. 51–57 p.
4. Nojima T. Origami modeling of functional structures based on organic patterns // Master's thesis, Graduate School of Kyoto University, Kyoto, Japan, 2002.
5. Kokkonen Petteri. Design guide for additive manu-facturing of metal components by SLM process. Leevi Salonen. 148 p.

УДК 629.78; 536.248; 621.382

## ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ СВЕТОВОГО ИСТОЧНИКА ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕРМОВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

А. А. Шевчук<sup>1,3\*</sup>, В. Г. Бутов<sup>2</sup>, В. В. Двирный<sup>1,3</sup>, О. В. Пастушенко<sup>1</sup>, А. А. Рудько<sup>1</sup>

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

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск, Красноярский край, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

<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

*Расположение перспективного светодиодного имитатора внеатмосферного солнечного излучения непосредственно в термовакуумной камере требует вывода избыточного тепловыделения светодиодных сборок за пределы термовакуумной камеры. Предлагаемое решение основано на применении контурных тепловых труб.*

*Ключевые слова: термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод, контурная тепловая труба.*

## THERMAL STABILIZATION OF THE SOLAR SIMULATOR LIGHT SOURCE IN A THERMAL VACUUM CHAMBER USING LOOP HEAT PIPES

A. A. Shevchuk<sup>1,3\*</sup>, V. G. Butov<sup>2</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1,3</sup>, O. V. Pastushenko<sup>1</sup>, A. A. Rud'ko<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> National Research Tomsk State University

36, Lenin prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

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

*The location of AM0 LED solar simulator directly in a thermal vacuum chamber is very promising. However, it requires efficient removal of excess heat of LED assemblies outside the thermal vacuum chamber. The proposed solution is based on the use of loop heat pipes.*

*Keywords: thermal vacuum tests, solar simulator, light emitting diode, loop heat pipe.*

Одним из наиболее перспективных путей совершенствования имитаторов солнечного излучения (ИСИ) для термовакуумных испытаний (ТВИ) космических аппаратов (КА) является построение светового источника ИСИ на основе высокоэффективных светодиодов [1]. В сравнении с традиционно используемыми газоразрядными ксеноновыми лампами, это позволяет разместить световой источник ИСИ непосредственно в термовакуумной камере, исключить громоздкую и сложную оптическую схему и тем самым значительно повысить его эффективность, световые и эксплуатационные характеристики.

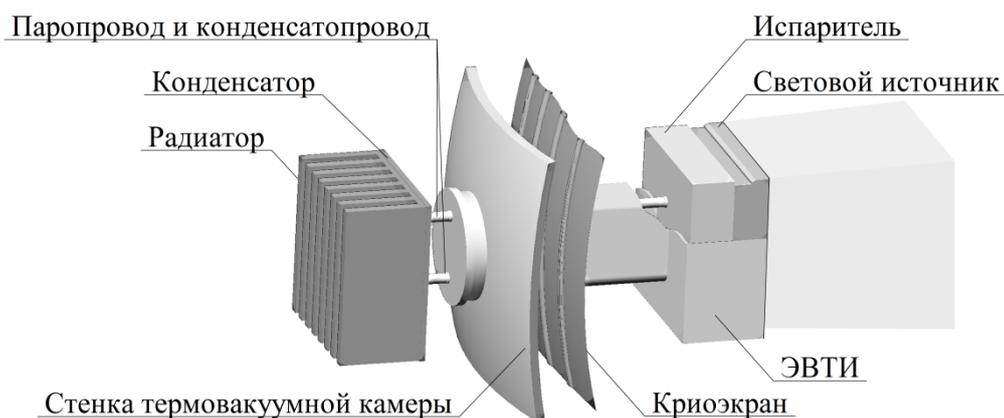
Результаты измерений световых характеристик последних разработок высокоэффективных светодиодныхборок и математического моделирования светового источника с их использованием показывают, что его световые характеристики соответствуют предъявляемым к ИСИ для ТВИ КА требованиям. Результаты подробно рассмотрены в [2].

Известно, что эффективность и срок службы любого светодиода напрямую зависят от его рабочей температуры и, как правило, при ее значении выше 85 °С резко снижаются, а выше 125 °С происходит выход светодиода из строя. Не менее важно поддерживать положительную температуру неработающих светодиодных сборок в режиме экстремально низких температур ТВИ. Поэтому следующими задачами, которые необходимо в первую очередь решить при создании светодиодного ИСИ для ТВИ КА, являются термоизоляция светового источника и термостабилизация применяемых светодиодных сборок с выводом их избыточного тепловыделения за пределы термовакuumной камеры.

Проблема термостабилизации может быть решена традиционным способом – принудительной циркуляцией жидкого теплоносителя в замкнутом контуре между теплообменниками светодиодных сборок и радиатором или холодильной машиной (чиллером) за пределами термовакuumной камеры. Несмотря на относительную простоту способа, для его реализации необходимы циркуляционные насосы и внешний источник электроэнергии. При этом для предотвращения выхода светодиодных сборок из строя требуются дополнительные меры по повышению надежности системы: резервирование насосов, бесперебойное электропитание и т.д.

Альтернативным, более простым и надежным решением является построение системы термостабилизации на основе контурных тепловых труб (КТТ), представляющих собой теплопередающую систему в виде двухфазного замкнутого контура. Циркуляция теплоносителя при этом происходит без приложения внешних сил и движущихся частей.

Принцип работы системы термостабилизации светового источника ИСИ в термовакuumной камере на основе КТТ показан на рисунке.



Система термостабилизации светового источника на основе КТТ

В случае, когда радиатор расположен выше испарителя, после конденсации пара в конденсаторе конденсаторопровод имеет столб жидкости с перепадом давления, обеспечивающим возврат конденсата в испаритель, тем самым замыкая испарительно-конденсационный цикл и обеспечивая циркуляцию теплоносителя. Если же испаритель расположен выше или на одном горизонте с радиатором, то для организации циркуляции теплоносителя в испарителе необходимо использовать капиллярную структуру, которая при испарении теплоносителя обеспечивает капиллярное давление, необходимое для возврата теплоносителя от конденсатора к испарителю [3, 4].

Изготовленный авторами макет испытан в нормальных условиях. На контактную поверхность испарителя установлена использованная ранее для моделирования световых характеристик светового источника светодиодная сборка LED ENGIN LZ7 производителя OSRAM [5] с номинальной потребляемой мощностью 18 Вт. При непрерывной работе в течение нескольких суток температура сборки стабилизировалась на уровне 60 °С.

Предварительные расчеты показали достаточную эффективность изоляции тепловыделения светового источника от внутреннего объема термовакuumной камеры традиционно применяемой экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ).

Удельный тепловой поток с одного квадратного метра на поверхности ЭВТИ светового источника составил 20 Вт. Температура внешнего слоя ЭВТИ находится в пределах минус 103 °С при температуре криогенных экранов камеры, равной минус 196 °С. Таким образом, использование термоизоли-

рованного светового источника ИСИ оказывает незначительное влияние на криогенные экраны термовакуумной камеры и не вносит погрешность в имитацию внешних условий для объекта ТВИ.

### 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. Майданик Ю. Контурные тепловые трубы высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2017. № 6 (166). С. 122-130.
4. Кисеев В., Аминев Д., Черкашин В. [и др.] Двухфазные теплопередающие системы для охлаждения светодиодных светильников // Полупроводниковая светотехника. 2011. Т. 3, № 11. С. 27-31.
5. Сайт производителя OSRAM. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (дата обращения: 09.09.2022).

### References

1. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy 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. Maydanik Yu. *Konturniye teplovyye truby vysokoeffektivniye teploperedayushchiye ustroystva dlya sistem okhlazhdeniya elektroniki*. [Loop heat pipes: highly efficient heat-transfer devices for cooling systems of electronics]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*. 2017, no. 6 (166), p. 122-130.
4. Kiseyev V., Aminev D., Cherkashin V., Murzin R. *Dvukhfaznyye teploperedayushchiye sistemy dlya okhlazhdeniya svetodiodnykh svetil'nikov* [Two-phase heat transfer systems for cooling LED luminaires]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2011, vol. 3, no. 11, p. 27-31 (In Russ.).
5. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. OSRAM, 2021. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (accessed: 09.09.2022).

© Шевчук А. А., Бутов В. Г., Двирный В. В.,  
Пастушенко О. В., Рудько А. А., 2022

УДК 629.76/78.001.63

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ ШТАНГИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА

Д. О. Шендалев, С. А. Пикулин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: 19pikulina@mail.ru

*Рассмотрены вопросы обеспечения точности и жесткости штанги трансформируемого рефлектора космического аппарата связи. Предложен алгоритм выбора схемы армирования штанги.*

*Ключевые слова: трансформируемый рефлектор, температурные деформации, схема армирования.*

## ALGORITHM FOR SELECTING THE REINFORCEMENT SCHEME OF THE BOOM OF A LARGE-SIZED TRANSFORMABLE REFLECTOR

D. O. Shendalev, S. A. Pikulin

Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: 19pikulina@mail.ru

*The issues of ensuring the accuracy and stiffness of a boom of a transformable reflector of a communication spacecraft are considered. An algorithm for choosing the reinforcement scheme of the boom is proposed.*

*Keywords: transformable reflector, temperature deformations, reinforcement scheme.*

Антенны КА должны обеспечивать высокое качество сигнала и передавать его в заданную область пространства с точностью, не ниже установленной требованиями. Одним из основных факторов, влияющих на геометрическую точность конструкции антенны при ее эксплуатации на орбите, являются температурные воздействия, приводящие к деформациям элементов конструкции [1]. Кроме того, большую роль в точности наведения играет система ориентации и стабилизации. Для исключения влияния антенны на управляемость КА необходима частотная развязка антенны и КА, для чего необходима достаточная жесткость антенны [2].

Перечисленные выше условия определяют основные требования к конструкции антенны: геометрическая точность и жесткость. К данным факторам особенно чувствительны разворачиваемые конструкции крупногабаритных антенн.

Для формирования такой антенны необходимо выставить друг относительно друга закрепленные на КА отражающую поверхность и облучающую систему. Ограничения на габариты КА в стартовом положении приводят к необходимости использования для крупногабаритных антенн раскрываемых штанг для вынесения отражающей поверхности на заданное расстояние относительно корпуса КА в рабочем положении. Пример конструкции рефлектора представлен на рис. 1.

В данной работе рассмотрены вопросы проектирования штанги трансформируемого рефлектора. В качестве основного элемента штанги, формирующего ее длину, рассматривается композитная труба. Одним из возможных вариантов изготовления труб является метод мокрой намотки углепластикового жгута на цилиндрическую оправку.

Особенностью композиционных материалов является возможность получения требуемых характеристик за счет выбора количества слоев и направления их укладки – схемы армирования.

Целью данной работы является создание алгоритма выбора схемы армирования, обеспечивающей минимальные отклонения рефлектора на штанге от температурных деформаций при выполнении требований по жесткости и массе конструкции.

Задачами являются:

- определение основных факторов, влияющих на параметры трубы;
- разработка алгоритма расчета.



Рис. 1. КА «Eurosat» с рефлектором диаметром 12 метров

Одним из основных факторов, влияющих на точность наведения антенны, являются тепловые воздействия. Вследствие наличия перепада температуры из-за неравномерности нагрева по сечению штанги происходит ее изгиб. Уменьшения отклонений можно добиться за счет применения ЭВТИ, что увеличит массу конструкции. Также можно минимизировать перепад температуры с помощью выбора схемы армирования, обеспечивающей высокую теплопроводность в кольцевом направлении трубы [3]. Единственным способом достичь нулевых деформаций является выбор схемы армирования, при которой КТР материала трубы будет равен нулю.

Изгиб вносит наибольший вклад в отклонение в виду большой длины штанги. Для уменьшения угловых отклонений фокальной оси рефлектора, возникающих при изгибе штанги необходимо добиться нулевого значения КТР в направлении оси трубы, что видно из формулы для угла поворота штанги под действием перепада температур [4]:

$$\theta = \frac{\alpha_x \Delta T L}{H}$$

где  $\Delta T$  – перепад температуры по сечению;  $H$  – высота сечения;  $L$  – длина штанги;  $\alpha_x$  – КТР.

Как было сказано выше для обеспечения требуемой минимальной частоты колебаний штанга должна иметь необходимую жесткость, для чего может потребоваться большой диаметр  $D$ . При этом должны быть выполнены требования по массе  $M_{max}$  и не превышению максимально допустимого диаметра для размещения в зоне полезного груза на РН.

На этапе выведения должна быть обеспечена прочность штанги. Должен быть введен запас. Принимается, что на этапе проектирования запас прочности должен быть по крайней мере 2. Дальнейшая оценка прочности осуществляется после конструктивной проработки всей штанги и обеспечивается в том числе устройствами зачекочки.

На рис. 2 представлена блок-схема, предлагаемая для расчета схемы армирования.

На первом этапе необходимо исходя из заданных параметров рефлектора ( $m_p$  – масса рефлектора,  $J_p$  – момент инерции относительно точки закрепления на штанге) определить минимально-допустимые жесткости штанги на изгиб и кручение ( $EJ$ ,  $GJ_p$ ), обеспечивающие заданную минимальную частоту  $f_{min}$  колебаний рефлектора на штанге.

Далее на первом шаге расчета задаются количеством слоев  $N$  симметрично армированной трубы (под слоем понимается пара монослоев углепластика с симметричными углами армирования). Со-

гласно теории слоистых композиционных материалов [5], определяются углы намотки  $\{\varphi\}$ , обеспечивающие нулевой КТР в направлении оси трубы. Таких схем может быть несколько при условии выбора разных углов намотки в разных слоях.

Для найденных схем, вычисляется модуль упругости вдоль оси трубы  $E_x$  и модуль сдвига  $G_{xy}$  (для полного пакета слоев), толщины монослоев  $\{h\}$  и суммарная толщина пакета  $h_\Sigma$  (толщина стенки). Исходя из требуемых жесткостей вычисляется диаметр трубы. Если он больше допустимого – количество слоев увеличивается, расчет повторяется. Если толщина стенки слишком маленькая с точки зрения технологии изготовления и эксплуатации на земле – толщина стенки увеличивается. Далее определяется масса трубы  $M$  и сравнивается с допускаемой. Затем проводится ориентировочный расчет прочности.

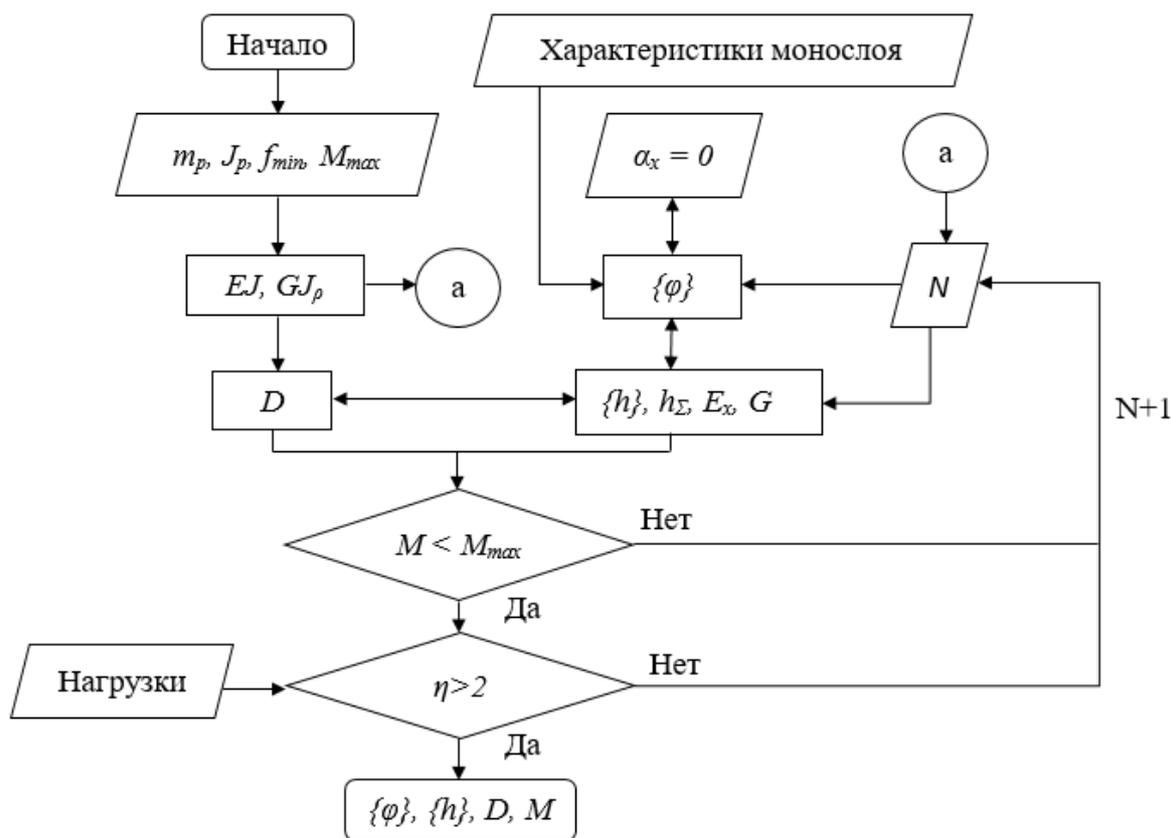


Рис. 2. Алгоритм выбора параметров трубы

В случае невыполнения требований по массе и/или прочности увеличивается количество слоев и расчет повторяется. Необходимо рассмотреть достаточно большое количество вариантов с различными схемами армирования. В виду необходимости рассмотрения большого количества вариантов и пересчета по мере уточнения характеристик других элементов антенны описанная процедура должна быть реализована в программе.

Таким образом, целью дальнейшей работы является создание алгоритма определения схемы армирования с нулевым КТР в направлении оси трубы и написание программы, позволяющей по заданным параметрам антенны выбрать рациональную (обеспечивающую минимальную массу) схему армирования.

### Библиографические ссылки

1. Егорова В. Д., Колесников А. П., Шендалев Д. О. Анализ влияния температурных деформаций штанг на точность наведения крупногабаритных антенн космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (09-12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч., часть 1 / под общ. ред Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 111-113.

2. M. Misawa. Stiffness Design of Deployable Satellite Antennas in Deployed Configuration // *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1998, Vol. 35. P. 380 - 386
3. Евдокимов А. С., Шендалев Д. О., Валишевская М. Г. и др. Постановка задачи выбора схемы армирования прецизионной штанги крупногабаритного рефлектора // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч. конф. (11-15 ноября 2019, г. Красноярск) : в 2 ч., часть 1 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2019. С. 93-94.
4. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.
5. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. М : Машиностроение, 1990. 512 с.

### References

1. Egorova V. D., Kolesnikov A. P., Shendalev. [Analyzing influence of the boom thermal distortions on the pointing accuracy of space large-size antenna]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. (09-12 noyabrya 2016, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch., chast' 1 / pod obshch. red Yu. Yu. Loginova.* [Reshetnev reading: proceedings of the XX intern. scientific. conf. (09-12 November 2016, Krasnoyarsk): 2 T. P. 1 / under General ed. Yu. Loginov]. Krasnoyarsk, 2016. P. 111-113.
2. M. Misawa. Stiffness Design of Deployable Satellite Antennas in Deployed Configuration. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1998, Vol. 35. P. 380 - 386
3. Evdokimov A. S., Shendalev D. O., Valishevskaya M. G., Valishevskii O. K. [Formulation of the problem of selection of large reflector precision boom laminate]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. (11-15 noyabrya 2019, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch., chast' 1 / pod obshch. red Yu. Yu. Loginova.* [Reshetnev reading: proceedings of the XXIII intern. scientific. conf. (11-15 November 2019, Krasnoyarsk): 2 T. P. 1 / under General ed. Yu. Loginov]. Krasnoyarsk, 2019. P. 93-94 (in Russ).
4. G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. Matveev. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov.* [Handbook of the resistance of materials]. Kiev, *Nauk. dumka*, 1988. 736 p.
5. V. V. Vasilyev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin and other. *Kompozicionnie materialy: spravochnik.* [Composite materials: handbook]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1990. 512 p.

© Шендалев Д. О., Пикулин С. А., 2022



**Секция**

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО  
И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

УДК 629.7.036

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КЛАПАНА ПЕРЕПУСКА ВОЗДУХА НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА**

Е. С. Горячкин, И. А. Кудряшов, А. И. Щербань, Ю. Д. Новикова

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 клапана перепуска воздуха на характеристики осевого компрессора.*

*Ключевые слова: осевой компрессор, CFD-моделирование, лопаточные машины, характеристики, клапан перепуска воздуха.*

## **ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE AIR BLEED VALVE ON THE PERFORMANCE OF THE AXIAL COMPRESSOR**

E. S. Goryachkin, I. A. Kudryashov, A. I. Shcherban, U. D. Novikova

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 an air bleed valve on the characteristics of an axial compressor.*

*Keywords: axial compressor, CFD-modeling, turbomachinery, performance, air bleed valve.*

Газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой одну из сложнейших и наукоемких технических систем. Для создания ГТД используются передовые достижения современных технологий в таких направлениях науки как: газовая динамика, процессы горения, теплопередача, материаловедение, динамика прочности, механика твердого тела, электроника и др.

Одним из основных параметров ГТД, который определяет его эффективность, является удельный расход топлива. Снижение удельного расхода достигается в процессе совершенствования ГТД за счет повышения эффективности термогазодинамического цикла [1]. Это достигается за счёт повышения температуры газа в камере сгорания, и как следствие этого – повышение оптимальной степени повышения давления в компрессоре [2].

Непрерывное увеличение степени повышения давления на проектном режиме в компрессоре приводит к увеличению средней нагрузки на ступень при сохранении количества ступеней и массогабаритных характеристик ГТД.

Газотурбинные двигатели в процессе жизненного цикла работают на непроектом режиме. Из-за этого возникает нерасчетное обтекание лопаток рабочих колес (РК) и направляющих аппаратов (НА) и как следствие из-за этого наблюдается рассогласование ступеней многоступенчатого компрессора. Наиболее чувствительными к изменению режима работы двигателя являются первые и последние ступени компрессора, так как именно в этих ступенях наблюдается несоответствие проектного и фактического значений расхода воздуха. Из-за снижения режима компрессора в первых ступенях снижаются коэффициенты расхода и возрастают углы атаки, что способствует отрыву потока и возникновению вращающегося срыва и помпажа компрессора и как следствие снижение запасов устойчивости работы компрессора и двигателя в целом. Поэтому одной из важных задач на этапе проектирования компрессора ГТД является обеспечение запасов газодинамической устойчивости (ГДУ) на нерасчетных режимах [3].

Обеспечение этого требования является задачей проектирования при создании осевого компрессора в составе двигателя.

Существует несколько способов регулирования осевых компрессоров:

1. Внедрение системы регулируемых НА;
  2. Перепуск воздуха из промежуточных ступеней многоступенчатого осевого компрессора [3].
- В современном двигателестроении данные способы применяются совместно в системе [4].

Целью данной работы является изучение влияния изменения величины отбираемого воздуха, при помощи которого осуществляется регулирование компрессора при помощи перепуска воздуха из промежуточных ступеней. В работе рассмотрена рабочая область шестиступенчатого осевого компрессора в зоне пониженных режимов работы компрессора. Детальный анализ выполнен на приведенной частоте 50% от расчетного.

Все исследования выполнены в программном комплексе Numeca FINETurbo. Конечно-объемная модель создана в модуле Numeca AutoGrid. В качестве рабочего тела использована модель реального воздуха, который представлен в источнике [5]. Для расчета характеристик использовались следующие граничные условия: интегральное значение полного давления и температуры, радиальное распределение угла потока в тангенциальном направлении на входе, статическое давление на выходе, частота вращения ротора, величина отбора воздуха.

Модель турбулентности, которая использовалась при расчетах – k-e (extended wall function).

В результате выполненных исследований получено, что при снижении nпр в первых ступенях возникает большая срывная область, которая негативно влияет на характеристики всего компрессора (рис. 1).

После расчета базового компрессора на пониженных режимах, введен клапан перепуска в виде упрощенной области с отбором воздуха. Последовательно исследовано влияние различных значений относительного отбора воздуха за третьей ступенью на характеристику компрессора при nпр=50%.

В результате ввода перепуска получено, что при увеличении величины перепуска воздуха срывная область снижается.

При изменении величины перепуска воздуха от 0% до 30% относительного расхода на входе в компрессор. При изменении величины отбора срывная область и как следствие – увеличению запасов устойчивости и эффективности компрессора на пониженных режимах (рис. 2).

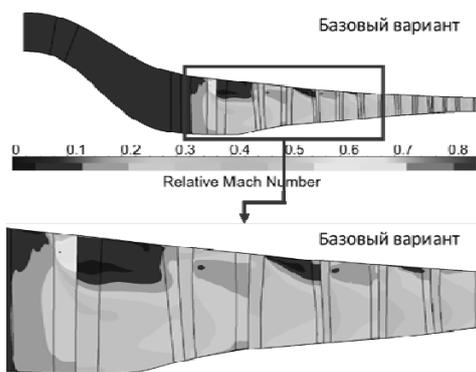


Рис. 1. Распределение относительно числа Маха в меридиональном сечении компрессора

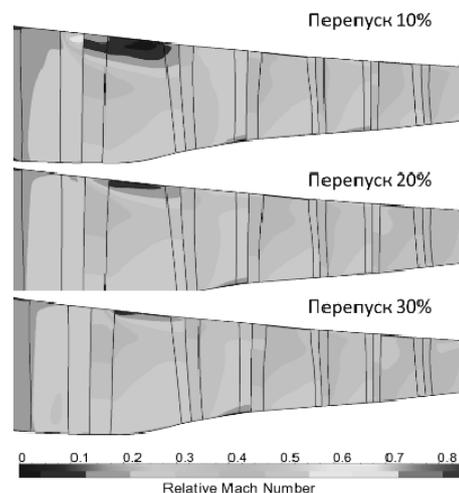


Рис. 2. Распределение числа Маха при относительных значениях расходах на перепуск в компрессоре

В результате работы получено что введение клапана перепуска благоприятно влияет на работу первых ступеней компрессора, снижается срывная область на первых ступенях за счет достижения оптимальных углов атаки на роторных и статорных венцах. Но одним из основных минусов использования перепуска воздуха является паразитная работа, которая затрачивается на увеличение давления воздуха, который выбрасывается во второй контур. В связи с этим следует использовать оптимальное значение перепускаемого воздуха совместно с другими способами регулирования компрессора на пониженных режимах.

В дальнейших работах планируется более детально оценить влияние перепуска на перераспределение параметров по ступеням, влияние на параметры компрессора до отбора и после отбора.

### Библиографические ссылки

1. Скибин, В. А., Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) [Текст] / В. А. Скибин, В. И. Солонин, В. А. Палкин. Центральный институт авиационного моторостроения, 2010. 424 с.
2. 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 термогазодинамический анализ. [Текст] / В. В. Кулагин, В. С. Кузьмичев – М.: Машиностроение, 2013. – 336 с.
3. Холщевников, К.В., Теория и расчёт авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холщевников. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.
4. Иноземцев, А. А., Газотурбинные двигатели [Текст] / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь, ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1201 с.
5. Дорофеев, В. М., Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 144 с.

### References

1. Skibin, V. A., Raboty vedushih aviadvigatel'nih kompanii v obespechenii sozdania perspektivnih aviacionnih dvigateley (analiticheskii obzor) [Works of leading aircraft engine companies to ensure the creation of advanced aircraft engines (analytical review)], CIAM, 2010. – 424 p.
2. 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.
3. Holshchevnikov, K. V. Teoriya i raschyot aviacionnyh lopatochnyh mashin [Theory and Calculation of Aircraft Blade Machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1970, 610 p.
4. Inozemcev, A. A. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm, Aviadvigatel, 2006, 1201 p.
5. Dorofeev, V. M. Termogazodinamicheskij raschet gazoturbinnnyh silovyh ustanovok [Thermogasodynamic calculation of gas turbine power plants]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 144 p.

© Горячкин Е. С., Кудряшов И. А., Щербань А. И., Новикова Ю. Д., 2022

УДК 621.822

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЁТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

В. А. Давыдик, Д. И. Орешкин, О. И. Рабецкая

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: LesTeh1@yandex.ru

*Разработаны методы расчёта давления масляного клина на стенку втулки и момента трения внутреннего и внешнего сопротивления масла с добавлением ультрадисперсного порошка путём решения уравнения Навье-Стокса численным методом на базе Maple 2021.*

*Ключевые слова: гидродинамический подшипник скольжения, уравнение Навье-Стокса, математическая модель, численный метод расчёта, ультрадисперсный порошок.*

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING A HYDRODYNAMIC SLIDING BEARING

V. A. Davydik, D. I. Oreshkin, O. I. Rabetskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: LesTeh1@yandex.ru

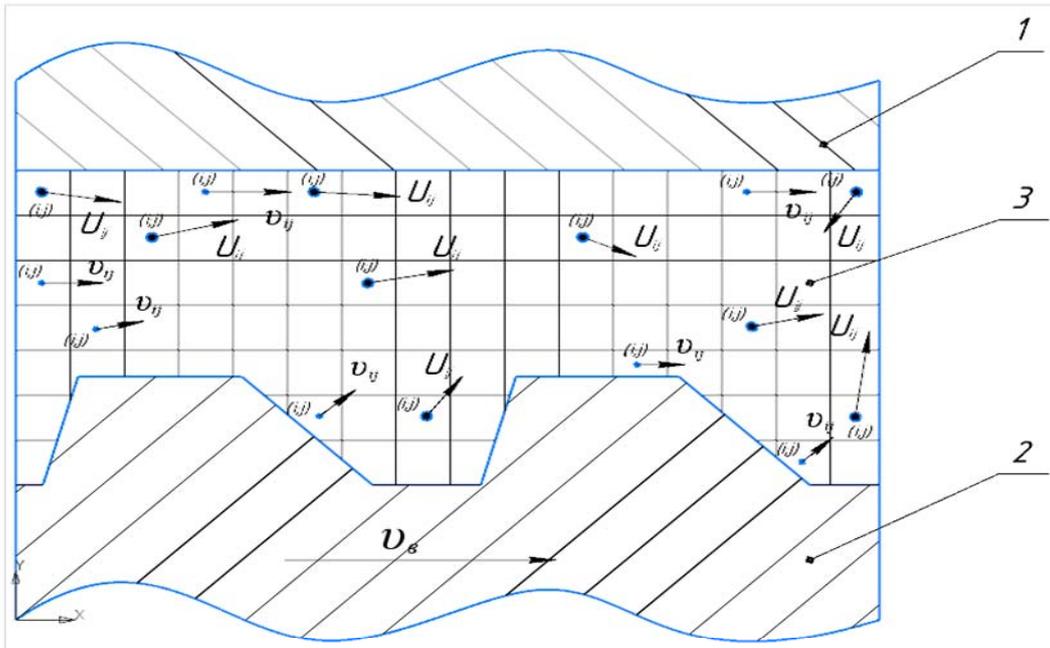
*Methods have been developed for calculating the pressure of the oil wedge on the sleeve wall and the friction moment of the internal and external oil resistance with the addition of ultrafine powder by solving the Navier-Stokes equation by numerical method based on Maple 2021.*

*Keywords: hydrodynamic sliding bearing, Navier-Stokes equation, mathematical model, numerical calculation method, ultrafine powder.*

Сегодня основным методом определения характеристик гидродинамического подшипника скольжения (далее ГПС) является решение уравнения Рейнольдса методом Рунге-Кутты. Данный подход является не точным, ввиду несовершенства математической модели. В связи с этим, решение уравнения Навье-Стокса численными методами, позволяет обеспечить необходимую точность определения характеристик ГПС. Кроме того, это позволит оптимизировать применение вычислительных мощностей ЭВМ.

### Описание математической модели

В основе предлагаемой математической модели лежит сектор поперечного сечения типового ГПС, размер которого позволяет пренебречь радиальной кривизной узла (втулки и вала). На данном участке задаётся координатная сетка, шаг которой позволяет учитывать дефекты поверхностей (шероховатость, волнистость) и присутствующие в масле частицы ультрадисперсного порошка (см. рисунок). Заданная координатная сетка ограничивает элементы площади. Присвоим имя каждому элементу, согласно координате левой нижней точки элемента. При этом, частице, находящейся в момент времени  $t$  внутри ячейки, присваивается номер этой ячейки. Предположим, что жидкость внутри каждой клетки, движется ламинарно, и присвоим каждому элементу функцию скорости  $v_{ij}$ , зависящую от времени  $t$ . Аналогичным образом рассмотрим движение каждой отдельной частицы порошка в масляном клине, при этом, в отличие от элемента жидкости, положение частицы будет определяться с некоторой точностью. На основе уравнения Навье-Стокса аналитически выразим функцию скорости элемента жидкости  $v_{ij}$ , и применяя реологический закон Ньютона и закон гидродинамического сопротивления выразим аналитически скорость каждой частицы  $U_{ij}$ .



Элемент сечения подшипника

1. Втулка (условно гладкая).
2. Вал (с условным изображением шероховатости).
3. Масляный клин

$$\begin{cases} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = F_x - C_x \frac{(v_{i-1}^2 - v_{i+1}^2)}{\Delta i} + v \frac{(v_{j-1} - v_{j+1})}{\Delta j^2}, \\ \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = F_y - C_y \frac{(v_{j-1}^2 - v_{j+1}^2)}{\Delta j} + v \frac{(v_{i-1} - v_{i+1})}{\Delta i^2}; \\ a_x^H = \mu \frac{1}{m} (v_{j-1} + v_{j+1}); \\ a_x^A = \frac{C_x S}{2m} (v_{i-1}^2 + v_{i+1}^2). \end{cases}$$

где  $F_x$  и  $F_y$  – проекции на соответствующие оси массовой силы,  $\frac{\Delta v_x}{\Delta t}$  и  $\frac{\Delta v_y}{\Delta t}$  – изменение скорости элементов по соответствующим осям координат,  $C_x$  и  $C_y$  – гидродинамическое сопротивление зуба, – кинематическая вязкость жидкости (масла),  $\Delta i$  и  $\Delta j$  – шаг сетки по соответствующим направлениям.

В начальный момент времени, скорость жидкости и поверхности вала равна нулю. При равномерном ускорении вращения вала, через определённый промежуток времени поверхность вала набирает заданную линейную скорость. При этом по закону, указанному выше, элементы жидкости приобретают скорость  $v_{ij}$ , а частицы, увлекаемые потоком масла приобретают скорость  $U_{ij}$ . Исходя из скорости граничных с втулкой элементов мы можем определить избыточное гидравлическое давление на втулку. Внутреннее трение жидкости будет рассчитано при помощи реологического закона Ньютона[1-4].

При дополнении математической модели условиями неоднородной волнистости и шероховатости рабочей поверхности, данный подход может иметь широкое применение в проектировании и подборе ГСП для различных режимов работы на различных типах смазывающих материалов, и оценки влияния на них ультрадисперсных присадок, что в свою очередь позволит сократить издержки производства на множественные ресурсные испытания подобных узлов[5].

### Библиографические ссылки

1. Н. В. Еркаев, Н. А. Нагайцева Математическая модель нестационарных движений вала в гидродинамическом подшипнике скольжения: Отдельный отиск Прикладная механика и теоретическая физика, Том 44, №5, 2003. С.119

2. С. А. Чернавский Подшипники скольжения: МАШГИЗ.М. Наука, 1968.

3. В. Ф. Терентьев, О. И. Рабецкая, Н. В. Еркаев Влияние волнистости рабочей поверхности на динамические характеристики подшипникового узла скольжения: Известия вузов. Машиностроение. 2004. № 10. С. 58–61.

4. В. Ф. Терентьев, Н. В. Еркаев, С. Г. Докшанин Трибонадежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций. Новосибирск : Наука, 2003.

5. О. И. Рабецкая, улучшение рабочих характеристик радиальных подшипников скольжения: Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2008.

### References

1. N. V. Yerkaev, N. A. Nagaytseva Mathematical model of unsteady shaft movements in a hydrodynamic sliding bearing: A separate impression of Applied Mechanics and theoretical Physics, Volume 44, No. 5, 2003. p.119

2. S. A. Chernavsky Sliding bearings: MASHGIZ.M. Nauka, 1968.

3. V. F. Terentyev, O. I. Rabetskaya, N. V. Yerkaev The influence of the undulation of the working surface on the dynamic characteristics of the sliding bearing assembly: Proceedings of universities. Mechanical engineering. 2004. No. 10. pp. 58-61.

4. V. F. Terentyev, N. V. Yerkaev, S. G. Dokshanin Reliability of bearing assemblies in the presence of modified lubricating compositions. Novosibirsk : Nauka, 2003.

5. O. I. Rabetskaya, improving the performance of radial sliding bearings: Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Sciences, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2008.

© Давыдик В. А., Орешкин Д. И., Рабецкая О. И., 2022

УДК 536.253

## К МЕТОДИКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КАНАЛАХ

Н. А. Данилов, А. А. Арнгольд, А. А. Зуев, В. О. Гоголев

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

*Разработан стенд для экспериментальных исследований течения газового потока с учетом теплоотдачи на различных экспериментальных участках, построены экспериментальные и теоретические зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от температуры газового потока. Проведен сравнительный анализ с теориями других авторов.*

*Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, экспериментальные исследования, энергетические установки.*

## TO THE METHOD OF EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN SPATIAL CHANNELS

A. A. Zuev, A. A. Arngold, N. A. Danilov, V.O. Gogolev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*Designed stand for experimental studies of flow of the gas stream with the heat at different experimental sites, built the experimental and theoretical dependence of the average heat transfer coefficient on the temperature of the gas stream. A comparative analysis of the theories of others.*

*Keywords: heat transfer coefficient, experimental studies, power installations.*

Достижение высоких характеристик энергетическими установками во многом определяется совершенством преобразования энергии в проточной части, проектированию и исследованию которых посвящено достаточно много работ. Большинство работ посвященных методикам расчета и проектирования энергетических установок основано на результатах экспериментальных исследований, имеющих узкое приложение в области определения конструктивных и режимных параметров [1].

Для подтверждения теоретических зависимостей разработан стенд для экспериментального исследования течения газового потока с учетом теплоотдачи в полостях характерных полостям энергетических установок.

В состав экспериментального стенда входит контрольно-измерительное оборудование, система подготовки режимных параметров (расхода и температуры воздуха) рабочего тела, система подачи охлаждающей жидкости, исследуемые участки. Участки предназначены для исследования течения с теплоотдачей равномерного прямолинейного и закрученного течения в трубе (участки № 1, № 2) и вращательного течения с теплоотдачей в торцевой щели с двумя неподвижными стенками (участок № 3).

Участок № 1 представляет теплообменный аппарат, по внутренней трубе которого течет нагретый воздух, а в кольцевом зазоре по схеме «противоток» охлаждающая вода. Участок №2 аналогичен участку № 1, но в исследуемую полость течения рабочего тела введена винтовая вставка закручивающая поток, где реализуется вращательное течение по закону «твердого тела». Исследуемый участок № 3 представляет торцевую полость с двумя неподвижными стенками, подвод воздуха осуществляется тангенциально, на торцевой стенке выполнен теплообменный аппарат. Вращательное течение потока осуществляется по закону «свободного вихря».

Для обеспечения безкавитационной работы насоса в схеме предусмотрен наддув, а так же вентиль 23 для слива воды и вентиль 24 для набора. Наддув рабочей емкости осуществляется из сети высокого давления и регулируется вентилями 15 и 25, редуктором 26. Давление наддува контролируется манометром 27. В рабочей емкости предусмотрен вентиль 28 для стравливания воздушной подушки. Для предотвращения аварийной ситуации на емкости 21 предусмотрен предохранительный клапан 29. Для охлаждения подшипников турбины на стенде предусмотрена магистраль с холодной водой и вентилем 30. Расход холодной воды для исследуемого участка контролируется датчиком расхода 31 и вентилем 32, температура воды на входе в исследуемый участок контролируется датчиком 33 и датчиком температуры 34 на выходе [2].

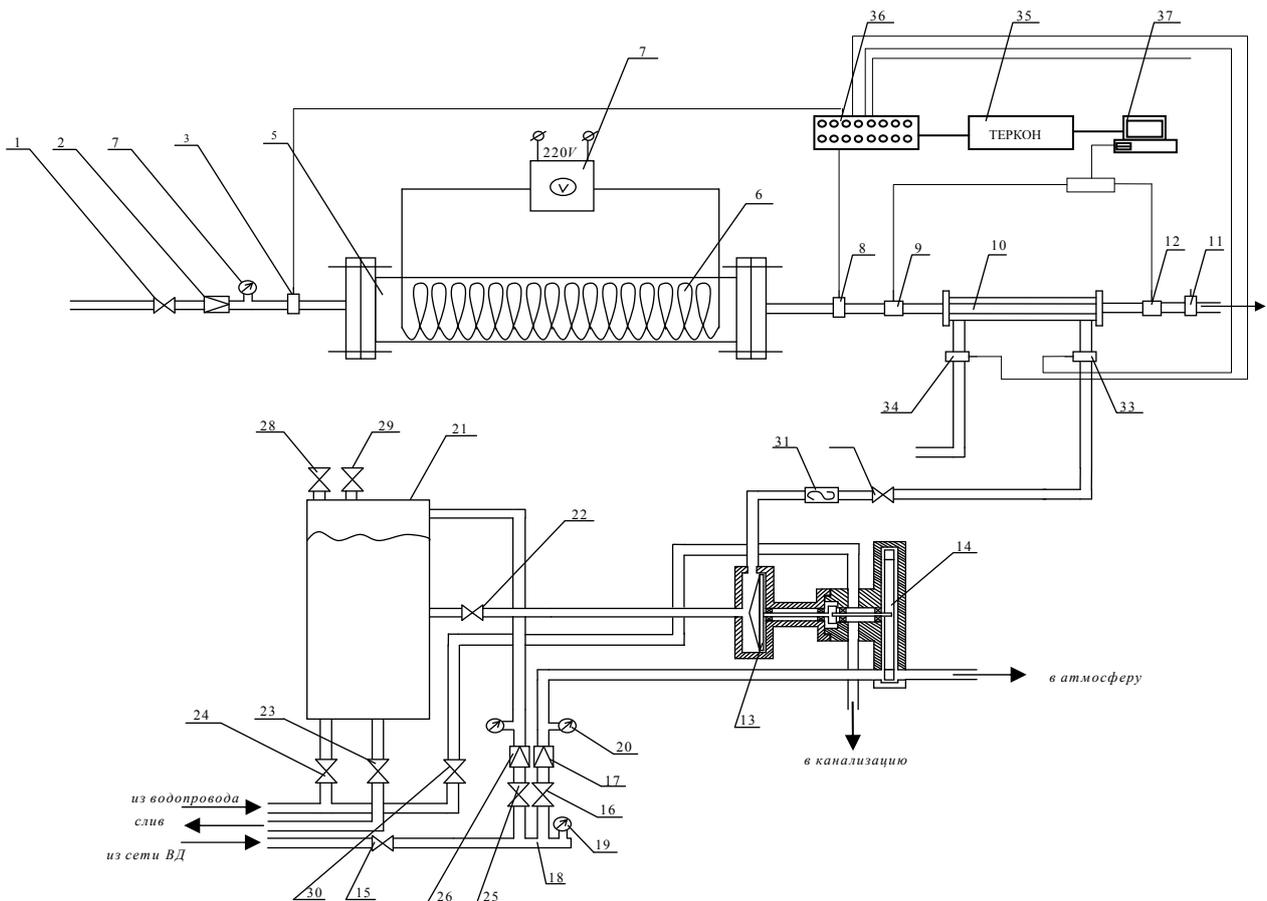


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда со сменными исследуемыми участками



Рис. 2. Исследуемый участок № 1 (гладкая труба) и № 2 (труба с винтовой вставкой)

Совпадение теоретических результатов с экспериментальными данными дает степенной закон распределения профиля скорости и не превышает погрешности 5 %.



Рис. 3. Экспериментальная установка № 3 (торцевая щель)

Средний коэффициент теплоотдачи в большей степени зависит от абсолютной скорости течения и в меньшей от температуры рабочего тела. С ростом скорости коэффициент теплоотдачи растет, а с ростом температуры падает.

#### Библиографические ссылки

1. Кишкин А. А. Исследование коэффициента теплоотдачи на основе двухслойной модели турбулентного 3D пограничного слоя. / А. А. Кишкин и др. // Научные работы Одесской национальной академии пищевых технологий. Министерство образования и науки Украины. Одесса: № 31. Т.1. 2007. 257 с.
2. Зуев А. А. Течение с теплоотдачей в полостях вращения энергетических установок космических и летательных / А. А. Зуев и др. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. Красноярск: №7 (40). 2011. С. 63–67.

#### References

1. Kishkin A. A. Study of heat transfer coefficient on the basis of two-layer model of turbulent 3D boundary layer. / A. A. Kishkin et al. // Scientific works of Odessa National Academy of Food Technologies. Ministry of Education and Science of Ukraine. Odessa: №31. T.1. 2007. 257 p.
2. Zuev, A. A. Heat-release flow in the cavities of the space and flying power installations (in Russian) / A. A. Zuev et al. (in Russian) // Bulletin of the Siberian State Aerospace University after M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk: №7 (40). 2011. p. 63-67. (In Russ.)

© Зуев А. А., Арнольд А. А., Данилов Н. А., Гоголев В. О., 2022

УДК 536.253

## ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ПОВОРОТЕ В ДЕВЯНОСТО ГРАДУСОВ

Н. А. Данилов, А. А. Зуев, В. О. Гоголев, Т. А. Федченко

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

*Рассмотрено течение газа по каналу постоянного сечения, в котором поток совершает поворот на 90 градусов. Скорости движения в канале малы по сравнению со скоростью звука, так что влиянием сжимаемости можно пренебречь. Были проведены опыты показывающие, что в сечениях криволинейного канала устанавливается неравномерное распределение скоростей и давлений, возникает поперечный градиент давления.*

*Ключевые слова: Криволинейный канал, модель течения газа, воздушный поток.*

## AIRFLOW AT A NINETY-DEGREE TURN

N. A. Danilov, A. A. Zuev, V. O. Gogolev, T. A. Fedchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dn.n1k@mail.ru

*The flow of gas through a channel of constant cross section, in which the flow makes a turn by 90 degrees, is considered. The velocities of movement in the channel are small compared to the speed of sound, so that the effect of compressibility can be neglected. Experiments were carried out showing that an uneven distribution of velocities and pressures is established in the sections of a curvilinear channel, and a transverse pressure gradient occurs.*

*Keywords: Curvilinear channel, gas flow model, air flow.*

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 отталкиваются к внешней стенке, то давление вдоль возрастает по сравнению с давлением входящего потока, а вдоль – уменьшается [1].

Была построена физическая модель (рис. 1), показывающая течение воздушного потока, при расходе 2800л/мин, а так же неравномерное движение воздуха на повороте.

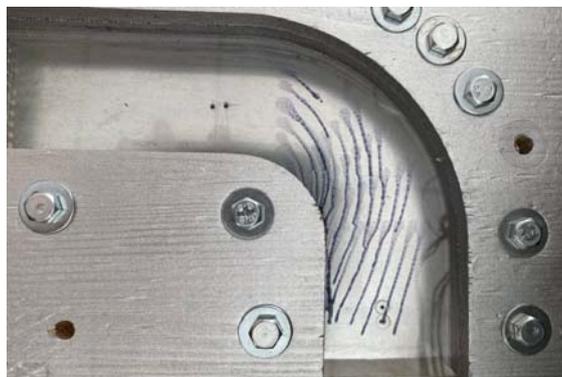


Рис. 1. Физическая модель установки

Частицы жидкости, движущиеся в пограничном слое вдоль плоских стенок, находятся под воздействием разности давлений и, обладая малой скоростью в направлении основного движения, перетекают к внутренней стенке, испытывая большое отклонение, чем частицы, более удаленные от стенок. Значительный интерес представляет собой проявление завихрений.

Необходимо подчеркнуть, что неравномерное распределение скоростей (рис.2), обнаруживается при внешнем обтекании тел (в пограничном слое и в кормовом следе).

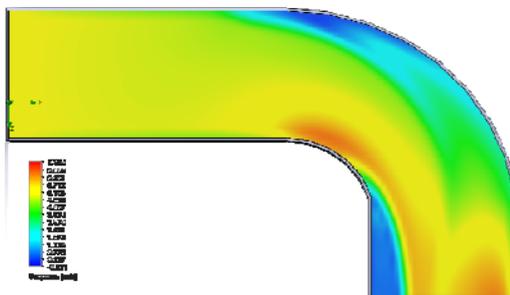


Рис. 2. Градиент распределения скорости

Сначала течение поджимается к стенке малого радиуса, а затем в противоположную сторону. В результате отклонения течения от центра образуются вихревые течения, как это видно на (рис. 3).

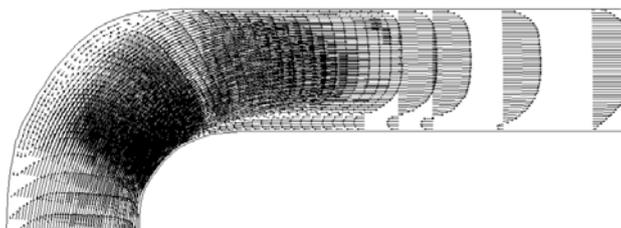


Рис. 3. Поле скоростей на криволинейном участке трубы

Профиль скорости имеет характерный турбулентный профиль. Движение частиц рассчитывалось для эквивалентных диаметров частиц от 10 до 500 мкм. Траектории частиц различных размеров представлены на рис. 4–7. 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

Дейч М. Е. Движение газа в криволинейных каналах. Техническая газодинамика Изд 2-е, переработал М. Л. Госэнергоиздат, 1961. С. 299-313.

Дыбрин А. А. Моделирование течения двухфазной смеси в криволинейных каналах газопровода. Интеллектуальные системы в производстве, 2013. С. 18-23.

### References

1. Deich M. E. The Movement of Gas in Curved Channels. Technical Gas Dynamics, 2nd edition, revised M.L. Gosenergoizdat. 1961, p 299-313.

2. Dybrin A. A. Simulation of the Two-Phase Mixture Flow in Curvilinear Channels of a Gas Pipeline. Intelligent systems in production. 2013, p. 18-23.

УКД 629.7.036

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОЙ ТЯГОЙ\*

К. И. Жариков\*, М. М. Дронь

Омский государственный технический университет  
Российская Федерация, 644050, г. Омск, пр. Мира 11  
E-mail: mmdron@omgtu.ru

*В данном исследовании рассмотрен вопрос проектного облика экспериментального образца химического ракетного двигателя с соплом, имеющим электромагнитный ускоритель заряженных частиц. Материалы работы направлены на решение важной научно-технической проблемы освоения космоса космическими аппаратами – создание энергетически эффективных энергетических установок.*

*Ключевые слова: электрореактивная тяга, электромагнитное поле, химический ракетный двигатель, продукты сгорания.*

## DETERMINATION OF PROJECT PARAMETERS OF A ROCKET PROPULSION WITH ELECTROREACTIVE THRUST

K. I. Zharikov\*, M. M. Dron'

Omsk State Technical University  
11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russian Federation  
E-mail: mmdron@omgtu.ru

*In this study, the question of the project appearance of an experimental sample of a chemical rocket engine with a nozzle having an electromagnetic particle accelerator is considered. The materials of the work are aimed at solving an important scientific and technical problem of space exploration by spacecraft – the creation of energy-efficient power plants.*

*Keywords: electroreactive propulsion, electromagnetic field, chemical rocket engine, combustion products.*

В настоящее время существуют большое многообразие двигательных установок, занявших соответствующую нишу в ракетно-космической технике. Так, основными энергетическими установками для выведения полезной нагрузки ракета-носителей и баллистических ракет являются химические ракетные двигатели способные создавать высокое значение тяги (до 10 МН) при относительно не высокой скорости истечения продуктов сгорания (обычно не превышающей 5000 м/с) [1]. Для космических аппаратов основными энергетическими установками являются – электростатические, электро-термические, плазменные, ионные ракетные двигатели по причине высокого удельного импульса (до 300000 м/с) [2], малого расхода топлива, а также способных работать на нескольких режимах (многократное включение от 10 секунд до 100 часов).

Однако у электрических ракетных двигателей имеются недостатки в виде низкой тяги (которая не превышает 200 Н) [3], большого потребления электроэнергии (до 100 кВт на 1 Н тяги), «паразитного» воздействия заряженных частиц на работу космического аппарата. Учитывая данные недостатки, эксплуатация ракетных двигателей на электрической энергии ограничивается в основном ориентацией и коррекцией орбиты космического аппарата.

---

\* Статья подготовлена в рамках выполнения работы при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4378.2022.4.

Таким образом, в настоящее время существует проблема разработки энергетически эффективных ракетных двигателей, обладающих заданными энергетическими параметрами.

Вариантом технического решения рассматриваемой проблемы может являться симбиоз технологии химического ракетного двигателя с электрическим ракетным двигателем для получения рабочего тела с повышенными энергетическими характеристиками. Так, в частности, в химических ракетных двигателях процессы горения топливных композиций протекают при достаточно высокой температуре (2000 ... 4000 К). В связи с этим во фронте пламени имеют место не только процессы диссоциации продуктов сгорания, но и ионизации. В таких продуктах сгорания присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы – ионы, которые уносятся вместе с газовым потоком [4-5]. Предполагается что, воздействуя электромагнитным полем на рабочее тело, протекающее через сопло «Лавая» химического ракетного двигателя, ионы, находящиеся в потоке продуктов сгорания, получают дополнительное ускорение. В результате создания дополнительной электрореактивной тяги приведет к повышению энергетической эффективности ракетного двигателя.

Проектированию ракетного двигателя предшествует задача по расчету и определению основных геометрических размеров камеры сгорания по заданным энергетическим характеристикам топливной пары и заданных проектных параметров (тяги, удельный импульс, массовый расход и т. д.). Для решения данной задачи необходимо определить три её основных размера: диаметр критического сечения, длина и диаметр камеры сгорания. Последние два параметра можно определить исходя из требуемого объема и времени пребывания продуктов сгорания в камере двигателя. Исходя из имеющихся данных о кинетике горения топлив в камере сгорания, т. е. условия пребывания продуктов сгорания в камере двигателя можно определить такие параметры как приведенная длина и требуемый объем камеры с учетом заданных расходов компонентов топлива. Задаваясь топливной парой, а также давлением и геометрическими параметрами камеры сгорания используем уравнением состояния газа для определения требуемого объема:

$$p_K V_{KC} = m_T R T_K, \quad (1)$$

где  $p_K$  – давление в камере сгорания [Па];  $V_{KC}$  – требуемый объем камеры сгорания [ $\text{м}^3$ ];  $m_T$  – масса топлива в камере сгорания [кг];  $R$  – газовая постоянная топливной пары в камере [Дж/кгК];  $T_K$  – температура горения компонентов [К].

Преобразовав уравнение (1) путем разложения массы топлива  $m_T$  на расход топлива и время пребывания  $\tau_{\text{пр}}$ , получим:

$$V_{KC} = \frac{\dot{m}_T \tau_{\text{пр}} R T_K}{p_K}, \quad (2)$$

где  $\dot{m}_T$  – расход топлива [кг/с].

Варьируя расходами компонентов топлива с учетом времени пребывания продуктов сгорания в камере двигателя, формируем зависимость приведенной длины для двигателя с топливной парой, где в качестве окислителя будет использоваться кислород ( $\text{O}_2$ ) а в качестве горючего применяться ациклические углеводороды (пропан, пропадиен, изобутан и др.).

Для этого используем зависимость для определения требуемого объема камеры сгорания ракетного двигателя в виде выражения:

$$L_{\text{прив}} = \frac{V_{KC}}{F_{\text{кр}}} = 4 \frac{V_{KC}}{\pi D_{\text{кр}}^2}, \quad (3)$$

где  $D_{\text{кр}}$  – диаметр критического сечения сопла.

На основании полученных данных (см. рисунок) сформированы требования к геометрическим параметрам камеры сгорания работающей на предложенной топливной паре для исследования ионизации продуктов сгорания.

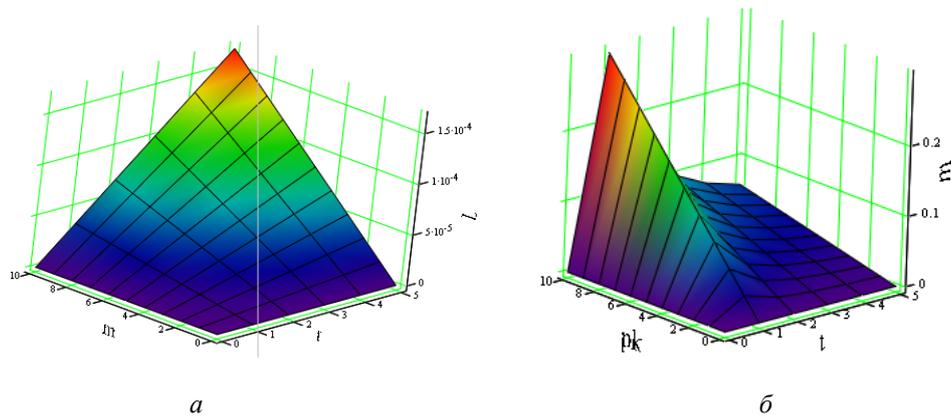


Рис. 1. Расчетные зависимости приведенной длины (а) от массового расхода и времени пребывания; массового расхода (б) от давления в камере сгорания и времени пребывания

### Библиографические ссылки

1. Snelgrove K. B., Saleh J. H. Toward a new spacecraft optimal design lifetime? Impact of marginal cost of durability and reduced launch price // *Acta Astronautica*, 2016. Vol. 127. P. 271–282.
2. Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П. Электрические ракетные двигатели. М. : Машиностроение, 1975. 272 с.
3. Космонавтика: Энциклопедия / Гл. ред. В. П. Глушко; Редколлегия: В. П. Бармин, К. Д. Бушуев, В. С. Верещетин и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. 528 с.
4. Экспериментальное исследование спектра электромагнитных колебаний, создаваемых факелом модельного жидкостного ракетного двигателя в условиях стенда огневых испытаний / Грибакин В.А., Поспищенко В.И., Болдырев К.Б., и др. // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2011. № 632. С. 94-99.
5. Нагель Ю.А. Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты // *Журнал технической физики*. 1999. Т. 69, № 8. С. 55-59.

### References

1. Snelgrove K. B., Saleh J. H. Toward a new spacecraft optimal design lifetime? Impact of marginal cost of durability and reduced launch price. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 127, p. 271–282.
2. Grishin S. D., Leskov L. V., Kozlov N. P. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. М. : Mashinostroenie, 1975. 272 p.
3. Kosmonavtika: Entsiklopediya / Gl. red. V. P. Glushko; Redkollegiya: V. P. Barmin, K. D. Bushuev, V. S. Vereshchetin i dr. – М.: Sov. entsiklopediya, 1985. – 528 p.
4. *Eksperimental'noe issledovanie spektra elektromagnitnykh kolebaniy, sozdavaemykh fakelom model'nogo zhidkostnogo raketnogo dvigatelya v usloviyakh stenda ognevykh ispytaniy* [Experimental investigation of the spectrum of electromagnetic oscillations created by the torch of a model liquid liquid rocket engine under the conditions of a fire test bench] / Gribakin V.A., Pospishenko V.I., Boldyrev K.B., i dr. // *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhayskogo*. 2011. № 632. p. 94–99.
5. Nagel' Yu.A. *Elektrizatsiya dvigateley pri istechenii produktov sgoraniya. Eksperimental'nye rezul'taty* [Electrical charging of engines in the efflux of combustion products. Experimental results] // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1999. Т. 69, № 8. p. 55–59.

© Жариков К. И., Дронь М. М., 2022

УДК 678-419:004.9

**АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА КОРПУСА  
КАМЕРЫ-ДЕМОНСТРАТОРА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ,  
ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ**

Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков, И. А. Фесенко, 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: Zhigurova.liza@yandex.ru

*В работе проводится анализ результатов исследования химического состава и механических характеристик материала камеры демонстратора ЖРД МТ, изготовленной методом 3D-печати из металлического порошка марки ПР08-ХН53БМТЮ на основе сплава Инконель 718.*

*Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, механические свойства, инконель.*

**ANALYSIS OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIAL  
OF THE BODY OF A LOW-THRUST ROCKET ENGINE DEMONSTRATOR  
CAMERA MADE BY 3D PRINTING**

E. E. Zhigurova, K. E. Mumber, R. A. Kazakov, I. A. Fesenko, V. P. Nazarov

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

*The paper analyzes the results of a study of the chemical composition and mechanical characteristics of the material of the MT LRE demonstrator chamber, made by 3D printing from metal powder of the PR08-KhN53BMTYu grade based on the Inconel 718 alloy.*

*Keywords: low-thrust rocket engine, additive technologies, mechanical properties, inconel.*

В последние годы аддитивные методы производства активно исследуются, совершенствуются и внедряются практически во все отрасли машиностроения. Ракетно– космическая промышленность на сегодняшний день является наиболее перспективным направлением для развития аддитивных технологий. Используя аддитивные технологии совместно с топологической оптимизацией конструкций возможно получить значительное сокращение трудозатрат, материалов, времени и средств при изготовлении деталей.

Но такие факторы как: высокие температурные нагрузки в процессе эксплуатации, сложная геометрическая форма конструкций, высокая стоимость материалов, зачастую не используемых в других отраслях машиностроения, накладывают трудности для повсеместного внедрения аддитивных методов производства в ракетостроение. Однако, несмотря на них, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в этом направлении интенсивно ведутся как в зарубежных, так и в отечественных организациях [1].

Следует отметить, что в ракетно-космической промышленности при проектировании новых изделий проводится большой объем опытно-конструкторских работ, в том числе изготовление образцов-демонстраторов и макетов узлов и агрегатов, в которых используется нештатные недорогостоящие материалы и комплектующие детали.

Аналогичная методология использована авторами статьи при проведении научно-исследовательских работ, направленных на изучение и диагностирование механических характеристик материала корпуса камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом 3D-печати из материала Инконель 718.

Инконель – жаропрочный сплав на никелевой основе, в своем составе содержит до 15% Cr и 9% Fe. Этот сплав до температуры 900 °С имеет высокую ударную вязкость и прочность [2].

Сплавы Инконеля стойки к окислению и коррозии. При нагреве Инконель формирует тонкую стабильную пассивирующую оксидную пленку, предохраняющую поверхность от дальнейшего разрушения. Инконель сохраняет прочность в широком промежутке температур, поэтому подходит для условий, где алюминий или сталь не работают [3].

Механические свойства сплавов данного типа в значительной мере зависят от способов литья и вида термической обработки.

При изготовлении образцов использовался порошок марки ПР08-ХН53БМТЮ. Первым испытанием является изучение химического состава модельного материала на спектрометре 67A1053 HITACHI PMI-MASTER UVR. Изучаемые образцы отпечатаны одновременно с камеры-демонстратора, на одном режиме печати. Оборудование для испытаний имеет сертификаты годности и аттестовано для применения на предприятии ракетно-космической отрасли.

Содержание легирующих элементов материала (в %) представлено в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав сплава, %**

Элемент	Ni	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Fe	Co	Ti	Al	C	S	P	As
%	51,2	0,115	0,124	20,6	3,27	0,116	16,8	0,181	1,03	0,688	0,0429	0,0365	0,0365	0,0036

По содержанию вышеуказанных элементов, материал образцов соответствует марке Инконель 718.

Для проверки механических характеристик проводились испытания материала образцов камеры-демонстратора на растяжение [4] и определение твердости по методу Виккерса [5]. В результате исследований были получены значения твердости материала, модуль упругости, предел прочности и предел текучести. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты испытаний**

Наименование детали	№ образца	Предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности ( $\sigma_B$ ), Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение ( $\sigma_s$ ), (%)/Н/мм <sup>2</sup>	Твердость, HB5/250
Образцы	1. С термообработкой	95,27	112,78	*	38
	2. С термообработкой	92,86	112,53	11,00	39
	3. С термообработкой	90,56	104,78	11,80	39
	4. С термообработкой	95,91	108,51	*	38
	5. Без термообработки	66,31	90,59	*	31
	6. Без термообработки	71,05	89,40	12,80	31
	7. Без термообработки	80,23	101,02	15,60	31
	8. Без термообработки	57,69	59,11	4,600	31
	*образцы разрушились по кернам				

По результатам испытаний механических свойств можно сделать вывод что, образцы, подвергавшиеся термообработке, имеют параметры значительно выше, чем не термообработанные образцы. Термообработка образцов привела к увеличению их прочностных характеристик, твердости, увеличению пластичности. Результаты испытаний необходимо использовать при проведении следующего этапа научно-исследовательских работ в области аддитивных технологий.

### Библиографические ссылки

1. Исследование механических характеристик материала корпуса камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом 3D-печати / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков, Н. С. Шестов, В. Ю. Журавлев. // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика. Сборник материалов Региональной научно-практической конференции. Красноярск.: Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. С. 7-11.
2. Жаропрочный сплав Инконель [Электронный ресурс]. URL: <http://saturn-sv.ru/inkonel>
3. Специальные марки стали европейского стандарта [Электронный ресурс]. URL: <https://auremo.org/monel-hastelloy-inconel.html>
4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2008. – 26 с.
5. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 1. Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2008. – 13 с.

### References

1. Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A., Shestov N. S., Zhuravlev V. Yu. [*Study of the mechanical characteristics of the material of the camera-demonstration camera of a small thrust engine produced by the method of 3D printing*]. Tests, diagnostics, reliability. Theory and practice. Collection of materials of the Regional scientific-practical conference. Krasnoyarsk: Editorial and Publishing Department of the Siberian State University. M. F. Reshetneva, 2022. P. 7-11.
2. Heat-resistant alloy Inconel [Electronic resource]. URL: <http://saturn-sv.ru/inkonel>
3. Special steel grades of the European standard [Electronic resource]. URL: <https://auremo.org/monel-hastelloy-inconel.html>
4. GOST 1497-84. Metals. Tensile test methods. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2008. – 26 p.
5. GOST R ISO 6507-1-2007. Metals and alloys. Vickers hardness measurement method. Part 1. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1987.- 13 p.

© Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Фесенко И. А., Казаков Р. А., Назаров В. П., 2022

УДК 621.454.2:669.715(001.5)

## **МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАМЕРЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ 3Д-ПЕЧАТИ**

Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков, Н. С. Шестов, И. В. Дергач

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

*Представлены результаты исследования структуры материала, применяемого для изготовления ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления.*

*Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, металлографический анализ, инконель.*

## **METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF A CAMERA MADE BY 3D PRINTING**

E. E. Zhigurova, K. E. Mumber, R. A. Kazakov, N. S. Shestov, I. V. Dergach

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

*The results of the study of the structure of the material used for the manufacture of a rocket engine by selective laser fusion are presented.*

*Keywords: low-thrust rocket engine, additive technologies, metallographic analysis, inconel.*

Разработка нового вида изделия – длительный и трудоемкий процесс, требующий нескольких этапов проектирования и оценки до начала массового выпуска. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире методы 3-мерного компьютерного моделирования. Современные системы компьютерного проектирования (CAD) также позволяют значительно сократить затраты времени и средств на разработку и конструирование новых изделий. Однако проблема изготовления первого физического образа и даже отдельной детали для изделия сколько-нибудь сложной формы остается наиболее узким местом, поскольку разработка технологии изготовления детали и соответствующей оснастки зачастую требуют затрат, сопоставимых со стоимостью разработки самого изделия [1].

В производстве авиационной и ракетно-космической техники проявляется повышенный интерес к применению аддитивных технологий. Ведущие компании мира проводят широкий круг НИОКР в данной области. Появились промышленные образцы изделий аддитивного производства, начат серийный выпуск ряда наименований деталей, прогнозируется расширение сферы их эффективного применения.

Выявлен повышенный интерес предприятий ракетно-космической промышленности России к потребности специалистов и выпускников вузов с сформированными компетенциями в вопросах аддитивных технологий, промышленного прототипирования и моделирования газодинамических процессов в элементах энергетических установок летательных и космических аппаратов.

В настоящее время остро стоит вопрос о подготовке и востребованности (конкурентно способности) выпускников ракетно-космических специальностей вузов, обладающих сформированными компетенциями в области аддитивных технологий и моделирования рабочих процессов в агрегатах и энергетических установках летательных аппаратов [2].

В данной работе был проведен металлографический анализ [3] образцов из материала Инконель 781, так как он является оптимальным для изготовления камеры двигателя малой тяги.

Инконель 718 – жаропрочный сплав высочайшего качества, обладающий содержанием молибдена, до 3%, а также легирован кобальтом до 1%, ниобием до 5,5% в своем химическом составе, который был получен с целью его эксплуатации в высокотемпературных, до 1000 градусов режимах [4].

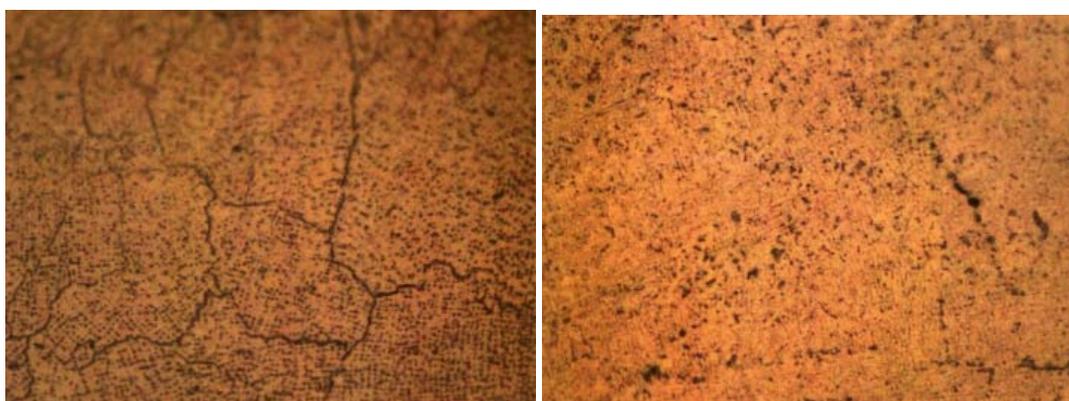
Исследование проводилось просмотром изготовленных микрошлифов после химического травления в реактиве (HCl – 70мл, CuSO<sub>4</sub> – 12 г, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 3 мл., спирт – 90 мл) на микроскопе MCOM ECLIPS MA200 при увеличении от 50 до 1000 крат.

Исследование сплава «Инконель» проводилось согласно Плана научно-исследовательских и учебно-лабораторных работ по изготовлению методом аддитивных технологий и исследованию характеристик комплекта моделей камер-демонстраторов ЖРД малой тяги на двух образцах: №1 – без термообработки и №2 после термообработки (в вакуумной печи при 1060°C в течение 60 минут).

Микроструктура материала представляет собой аустенит с выделениями интерметаллидов (рис. 1, а). В микроструктуре образца № 6 (без т/о) границы зерен не выявляются, размер зёрен образца №2 (с т/о) соответствует 3-5 номеру шкалы ГОСТ 5639–82 [5].

По результатам металлографического анализа можно сделать вывод что, микроструктура образца после проведения термообработки более однородная.

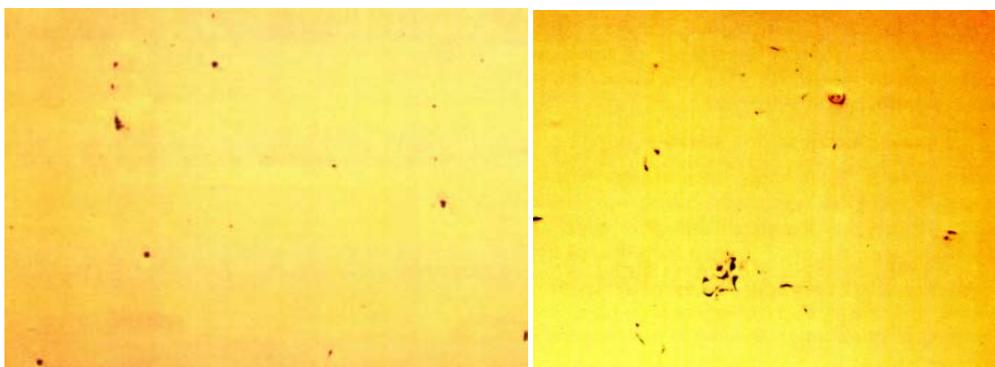
В материале образца №1 (без т/о) наблюдаются дефекты в виде окисных плен протяженностью 0,06-0,035 мм и участки скопления пор размером 0,015-0,085 мм (рис. 2, а). В материале образца №2 (с т/о) выявлены участки с микропористостью до  $\varnothing 0,020$ мм (рис. 2, б)



а

б

Рис. 1. Структура материала, увеличение x1000  
а – микроструктура образца №1 без термообработки  
б – микроструктура образца №2 после термообработки



а

б

Рис.2. Наличие дефектов структуры материала, увеличение x50  
а – образец №2 микропористость и окисная пленка (шлиф не травленный)  
б – образец №1 микропористость и окисная пленка (шлиф не травленный)

### Библиографические ссылки

1. Кулик В. И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие / В. И. Кулик, А. С. Нилов; Балт. Гос. Техн. Ун-н.-СПб., 2018-160с.
2. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Москва : ФГУП «СТАНДАРТИМФОРМ», 2003. – 21 с.
3. ГОСТ Р ИСО 4967-2015. Сталь. Определение содержания неметаллических включений. Металлографический метод с использованием эталонных шкал. Москва : ФГУП «СТАНДАРТИМФОРМ», 2016. – 40 с.
4. Европейская металлургическая компания [Электронный ресурс]. URL: [https://emk24.ru/wiki/nikel\\_i\\_ego\\_splavy/alloy\\_718\\_inconel\\_718\\_n07718\\_4330575/](https://emk24.ru/wiki/nikel_i_ego_splavy/alloy_718_inconel_718_n07718_4330575/) (дата обращения 08.09.2022)
5. Специальные стали и сплавы [Электронный ресурс]. URL: <https://francosteel.com/assortiment/spetsialnyye-splavy/inconel/inconel-718/> (дата обращения 08.09.2022).

### References

1. Kylik V. I., Nilov A. S., *Additivnii tehnologii v proizvodstve i raketno-kosmicheskoi tehniki* [additive technologies in the production of aviation and rocket and space technology products]; St. Petersburg, Baltic State Technical University, 2018-160 p.
2. GOST 5639-82 *Stali i splavi. Metodi viavlenia i opredelenia velichini zerna* [Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size]. Moscow, Standart inform Publ., 2003. – 21 p.
3. GOST 5639-82 *Stal. Opredelenie soderzhania nemetalicheskix vrlychenii. Metallograficheskii metod s ispolzovaniem etalonovix shkal.* [Steel Determination of the content of non-metallic inclusions. Metallographic method using reference scales.]. Moscow, Standart inform Publ., 2016. – 40 p.
4. Evropeiskaa metalyrgicheskkaa kompania [European Metallurgical Company] (In Russ.) Available at: [https://emk24.ru/wiki/nikel\\_i\\_ego\\_splavy/alloy\\_718\\_inconel\\_718\\_n07718\\_4330575/](https://emk24.ru/wiki/nikel_i_ego_splavy/alloy_718_inconel_718_n07718_4330575/) (accessed 08.09.2022).
5. Specialinii stali i splavi [Special steels and alloys] (In Russ.). Available at: <https://francosteel.com/assortiment/spetsialnyye-splavy/inconel/inconel-718/> (accessed 08.09.2022).

© Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Казаков Р. А.,  
Шестов Н. С., Дергач И. В., 2022

УДК 629.7.036

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕПУСКНЫХ КЛАПАНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

В. М. Зубанов, А. А. Харитонова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
E-mail: annakharitonoval5@gmail.com

*Работа посвящена исследованию влияния перепуска воздуха на характеристики компрессора.*

*Ключевые слова: газотурбинный двигатель, компрессор, CFD-моделирование, запас газодинамической устойчивости, перепуск воздуха.*

## THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF BYPASS VALVES ON THE CHARACTERISTICS OF AXIAL COMPRESSOR

V. M. Zubanov, A. A. Kharitonoval

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: annakharitonoval5@gmail.com

*The work is devoted to the influence of air bypass on performance of the compressor.*

*Keywords: gas turbine engine, compressor, CFD modeling, gas dynamic stability margin, air bypass.*

На данный момент одной из важных задач в газотурбинном двигателестроении является повышение их эффективности, надежности и эксплуатационных свойств [1]. Энергетическая эффективность газотурбинной установки (ГТУ) определяется рядом параметров. Одним из значимых параметров является значение запасов газодинамической устойчивости (ГДУ) компрессора. Особое внимание уделяют запасам устойчивой работы компрессора на пониженных режимах работы. Недобор ГДУ на этих режимах может привести к перепроектированию (доводке) всего компрессора [2].

В современное время для прогнозирования значений запасов ГДУ применяются средства вычислительной гидрогазодинамики (CFD) для моделирование рабочих процессов лопаточных машин. Средства CFD-моделирования позволяют с высокой точностью описать рабочие процессы, выполнить их детальный анализ при условии использования верифицированных численных моделей

Необходимость обеспечения запасов ГДУ на пониженных режимах работы обусловлена как стартом газотурбинной установки и выходом на номинальный режим работы, так и требованием работы ГТУ при повышенных температурах.

Один из способов регулирования компрессоров – перепуск воздуха, используемый на режимах с пониженными приведенными оборотами [3]. Перепуск воздуха из компрессора осуществляется обычно после первой ступени (группы ступеней) с помощью специального клапана, который управляется системой автоматического регулирования двигателя. На пониженных режимах работы компрессора первые ступени становятся более загруженными относительно выходной группы ступеней, чем на номинальном режиме. Перепуск воздуха позволяет первым ступеням (группам ступеней) работать при большем расходе, тем самым их разгрузив.

Целью данной работы является повышение запасов ГДУ компрессора на пониженных режимах работы при отсутствии изменений геометрии газодинамического тракта компрессора.

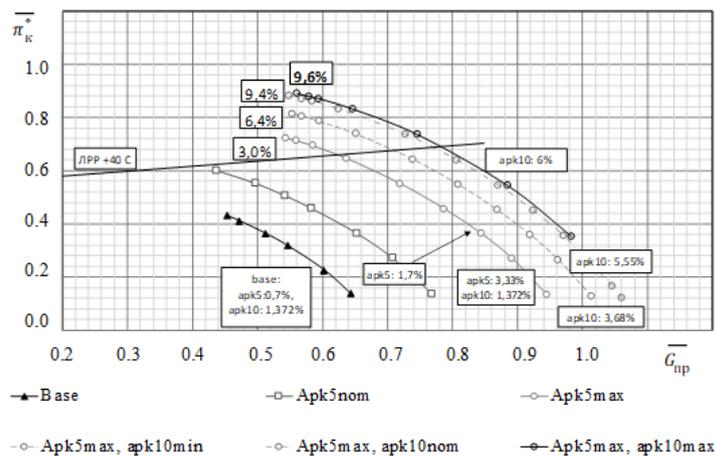
Чтобы достичь поставленную цель была поставлена задача сместить рабочую точку характеристики в область, удовлетворяющую требованиям по значениям запасов ГДУ.

Численный расчёт характеристик компрессора был выполнен с использованием CFD программного комплекса NUMECA FINE/Turbo в трёхмерной постановке с настройками расчетной модели, соответствующим существующим рекомендациям [4].

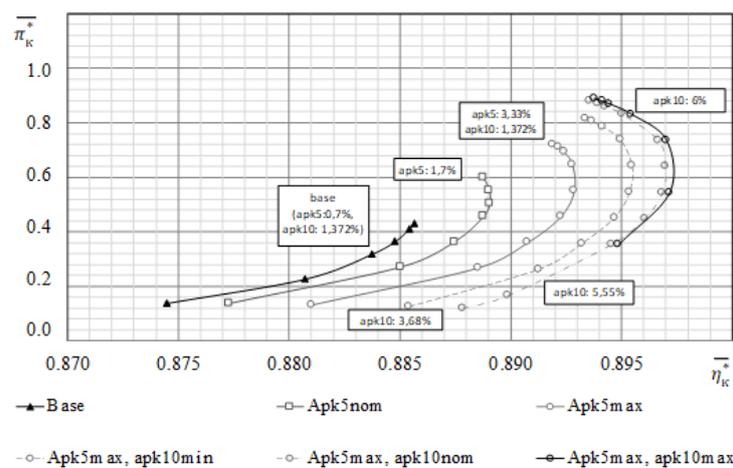
В исследуемом 16-ступенчатом компрессоре имелись отборы рабочего тела из тракта за пятой, восьмой, десятой и тринадцатой ступенями.

Граничными условиями на входе в компрессор являются значения полных давлений и температур в виде радиальных эпюр. Рабочим телом является сухой воздух [5]. На выходе из компрессора задавалось статическое давление с учётом радиальной неравномерности потока. В местах отборов воздуха из тракта компрессора задавалось значение соответствующего массового расхода воздуха в соответствии с экспериментальными данными.

Расчет при пониженной приведенной частоте вращения ротора от номинального показал недобор запасов ГДУ компрессора величиной 8%. Для повышения значения запасов необходимо было увеличить расход через АПК5 (за пятой ступенью). Максимальный расход через АПК5 равный 3,33% от расхода на входе в компрессор обеспечил запасы ГДУ 3,0%. Дальнейшее увеличение расхода через АПК5 не оказывало влияние на запасы ГДУ. Анализ рабочего процесса показал, что на этих режимах срыв уже происходил на лопатках 6-10 ступеней. Рассчитанные характеристики компрессора представлены на рисунке.



а



б

Рассчитанная зависимость:

а – степень повышения давления от расхода;

б – степень повышения давления от КПД

Увеличение расхода через АПК10 до 6 % позволило получить запасы ГДУ равные 9,6%. Характеристики на данном режиме сместились в область больших КПД и больших расходов по сравнению с базовым режимом и с вариантом открытия только АПК5. Дальнейшее увеличение расхода через АПК10 было ограничено тем, что в месте отбора скорость потока приблизилась к числу Маха равному 1.

При увеличении расхода через АПК10 до 6 % характеристика сместилась в область больших КПД. Так же наблюдается увеличение максимального значения степени повышения давления, что говорит о том, что первые ступени начинают работать в наиболее благоприятных для них условиях.

Таким образом, в данной работе был определен максимально возможный запас ГДУ компрессора при отсутствии изменений геометрии газодинамического тракта компрессора за счёт перепуска воздуха за 5 и 10 ступенями. Дальнейшее исследование связано с изучением других способов обеспечения запасов ГДУ.

### Библиографические ссылки

1. Иноземцев А. А., Газотурбинные двигатели [Текст] / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь, ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1201 с.
2. Koch, C.C. Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages [Text] / C. C. Koch // *Journal of Engineering Published Power*. 1981. P. 645-656.
3. Холщевников К.В., Теория и расчёт авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холщевников. М. : Машиностроение, 1970. 610 с.
4. 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.
5. Дорофеев В. М., Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 144 с.

### References

1. Inozemcev A. A. *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm, Aviadvigatel, 2006, 1201 p.
2. Koch, C.C. Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor. *Journal of Engineering Published Power*. 1981. P. 645-656.
3. Holshchevnikov K. V. *Teoriya i raschyot aviacionnyh lopatochnyh mashin* [Theory and Calculation of Aircraft Blade Machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1970, 610 p.
4. 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.
5. Dorofeev V. M. *Termogazodinamicheskij raschet gazoturbinnyh silovyh ustanovok* [Thermogasodynamic calculation of gas turbine power plants]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 144 p.

© Зубанов В. М., Харитонова А. А., 2022

УДК 669.017.16:669.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ТРУБКИ

В. В. Каширцев<sup>1</sup>, В. Н. Бутрим<sup>1</sup>, М. И. Силис<sup>1</sup>, А. С. Трушникова<sup>1\*</sup>, А. А. Берг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Композит» (АО «Композит»)  
Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

E-mail: \*mmt@kompozit-mv.ru

<sup>2</sup>АО «ОКБ «Факел»

Российская Федерация, 236003, г. Калининград, Московский пр., д. 181

*Представлены результаты сравнительного анализа микроструктуры и изменения электрического сопротивления капиллярных трубок, входящей в состав плазменного двигателя, из сплавов Ni80Cr20 и ХН50ВМТЮБ после длительных нагревов.*

*Ключевые слова: капиллярные трубки, плазменный двигатель, фазовые превращения, электрическое сопротивление.*

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE CHROMIUM-NICKEL ALLOY STRUCTURE ON THE ELECTRICAL RESISTANCE OF THE CAPILLARY TUBE

V. V. Kashirtsev<sup>1</sup>, V. N. Butrim<sup>1</sup>, M. I. Silis<sup>1</sup>, A. S. Trushnikova<sup>1\*</sup>, A. A. Berg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company "Compozite" AO "Compozite"  
4, Pionerskaya Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation

E-mail: \*mmt@kompozit-mv.ru

<sup>2</sup>AO "OKB "Fakel"

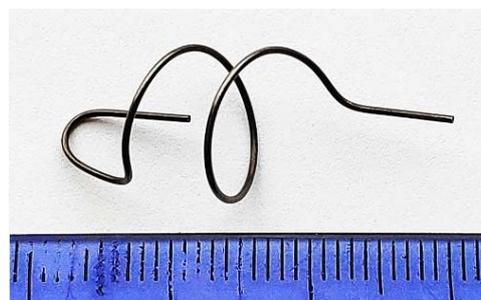
181, Moskovsky av., Kaliningrad, 236003, Russian Federation

*The results of a comparative analysis of the microstructure and changes in the electrical resistance of capillary tubes, which are part of a plasma engine, made of Ni80Cr20 and HN50VMTUB alloys after prolonged heating are presented.*

*Keywords: capillary tubes, plasma motor, phase transformations, electrical resistance.*

**Введение.** Сплав Ni80Cr20 однофазный – твердый раствор хрома в никеле. Сплав ХН50ВМТЮБ – двухфазный никель-хромовый сплав с содержанием хрома до 35% масс., дополнительно легированный тугоплавкими элементами (вольфрам, молибден, ниобий), титаном и алюминием. Основная фаза ( $\gamma$ ) – твердый раствор хрома и тугоплавких элементов в никеле, из которого в результате термической обработки выделяются частицы фазы ( $\alpha$ ) твердого раствора никеля в хrome. Исследовали капиллярные трубки (КТ) из сплава Ni80Cr20 иностранного производства и сплава ХН50ВМТЮБ-Ш [1] производства АО «Композит» [2-4]. Испытания КТ (см. рисунок) проведены ОКБ «Факел» в составе модельного узла регулятора расхода рабочего тела плазменного двигателя при имитации условий эксплуатации.

КТ из сплава Ni80Cr20 в исходном состоянии обладают пониженным электрическим сопротивлением 0,345 Ом (требуется не ниже 0,400 Ом), причем существенного изменения значений электрического сопротивления при длительных нагревах до температуры 800 °С не зафиксировано. Электрическое сопротивление КТ из сплава ХН50ВМТЮБ-Ш в исходном состоянии составляет 0,507 Ом и при нагреве до температуры 800°С снижается на 0,1 Ом за 1 ч при выдержке до 3 часов, далее



Внешний вид капиллярной трубки – элемента узла регулятора расхода рабочего тела плазменного двигателя

в течение 8 часов – на 0,07 Ом за 1 час выдержки. При имитации условий эксплуатации зафиксировано снижение значения электрического сопротивления КТ до уровня 0,420, а затем и за пределы допуска 0,400 Ом.

Металлографическими исследованиями с помощью растрового электронного микроскопа с определением химического состава методом микрорентгеноспектрального анализа установлено, что в ходе длительного воздействия температуры на поверхности трубок из обоих сплавов образуется слой оксида хрома, под поверхностью – зона, обедненная хромом. Ширина этой зоны медленно растет с ростом времени воздействия высоких температур.

Микроструктура КТ из сплава Ni80Cr20 после испытаний в течение до 3500 ч однофазная и мало меняется. В холодной зоне после испытаний обнаружено незначительное количество прослоек фазы на основе твердого раствора Cr. В результате испытаний происходит рост размера зерна в 2 раза: от 5-100 мкм в исходном состоянии до 20-200 мкм после испытаний и уменьшение количества двойников.

При длительном воздействии температуры в материале КТ из сплава ХН50ВМТЮБ-Ш происходят рост зерна и фазовые превращения, связанные с распадом твердого раствора хрома в никеле, увеличивается количество частиц фазы на основе Cr как в массиве зерна, так и по границам зерен. С увеличением времени высокотемпературных испытаний растет суммарный объемный процент фазы на основе твердого раствора Cr.

Ведется разработка нового хромо-никелевого сплава со стабильным при длительных нагревах уровнем электросопротивления на основе следующих положений: получение однофазной структуры твердого раствора хрома в никеле и упрочнение сплава дисперсными частицами второй фазы, стабильной во времени высокотемпературного воздействия для обеспечения стабильного значения электрического сопротивления.

#### Библиографические ссылки

1. ТУ 1-809-321-87 Сплавы хромовые и высокохромистые. Марки. Технические условия.
2. Технология изготовления капиллярных трубок из высокохромистого никелевого сплава / Бутрим В.Н., Каширцев В.Н., Егоров М.В. и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 2 (15). С. 78-83.
3. ТУ 1740-577-56897835-2013 Опытная партия капиллярных трубок из высокохромистого сплава а основе никеля марки ХН50ВМТЮБ (ВХ4А). Технические условия.
4. Бутрим В.Н., Егоров М.В., Каширцев В.Н. и др. Технологические аспекты повышения качества капиллярных трубок из высокохромистого сплава ХН50ВМТЮБ для систем подачи топлива ТКД // "Электроракетные двигатели. Прошлое. Настоящее. Будущее": материалы междунар. Науч.-практич. Конф., г. Калининград, ОКБ "Факел", 2015.
5. Бутрим В.Н., Каширцев В.В. Адаскин А.М. и др. Технологические приемы изготовления бесшовных труб малого диаметра из высокохромистого никелевого сплава // «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов»: материалы конф., Москва, ВИАМ, 2016.

#### References

1. TU 1-809-321-87 Splavy hromovye i vysokohromistye. Marki. Tekhnicheskie usloviya.
2. Tekhnologiya izgotovleniya kapillyarnyh trubok iz vysokohromistogo nikel'evogo splava / Butrim V.N., Kashircev V.N., Egorov M.V. i dr. // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2017. № 2 (15). S. 78-83.
3. TU 1740-577-56897835-2013 Opytnaya partiya kapillyarnyh trubok iz vysokohromistogo splava a osnove nikelya marki HN50VMTYUB (VH4A). Tekhnicheskie usloviya.
4. Butrim V.N., Egorov M.V., Kashircev V.N. i dr. Tekhnologicheskie aspekty povysheniya kachestva kapillyarnyh trubok iz vysokohromistogo splava HN50MVTYUB dlya sistem podachi topliva TKD // "Elektroraketnye dvigateli. Proshloe. Nastoyashchee. Budushchee": materialy mezhdunar. Nauch.-praktich. Konf., g. Kaliningrad, OKB "Fakel", 2015.
5. Butrim V.N., Kashircev V.V. Adaskin A.M. i dr. Tekhnologicheskie priemy izgotovleniya besshovnyh trub malogo diametra iz vysokohromistogo nikel'evogo splava // «Metallovedenie i sovremennye razrabotki v oblasti tekhnologii lit'ya, deformatsii i termicheskoy obrabotki legkih splavov»: materialy konf., Moskva, VIAM, 2016.

УДК 629.7.036

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАДРОТОРНОГО УСТРОЙСТВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА

И. А. Кудряшов, Е. С. Горячкин, Д. С. Тюрина

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 надроторного устройства на характеристики ступени компрессора.*

*Ключевые слова: компрессор, надроторное устройство, лопаточные машины, CFD-моделирование, Numeca.*

## THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CASING TREATMENT SLOTS ON THE COMPRESSOR STAGE CHARACTERISTICS

I. A. Kudryashov, E. S. Goryachkin, D. S. Tyurina

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 the casing treatment slots on the characteristics of the compressor stage.*

*Keywords: compressor, casing treatment slots, turbomachinery, CFD modeling, Numeca.*

Газотурбинный двигатель является одним из самых сложных технических устройств. В настоящее время одной из важных задач в газотурбинном двигателестроении является повышение энергетической эффективности двигателей. Одним из критериев работы компрессора является запас газодинамической устойчивости (ГДУ). Обеспечению запасов уделяется много внимания в процессе проектирования и доводки двигателя.

Запас ГДУ показывает, насколько удалена рабочая точка на линии совместной работы от границы помпажа при постоянной частоте вращения ротора [1].

Надроторное устройство (НРУ) используется для повышения запасов ГДУ, так как позволяет избавиться от негативных факторов потока, возникающих из-за входной неравномерности, работы компрессора на нерасчетном режиме.

Согласно исследованиям по влиянию НРУ лабиринтного типа на запасы ГДУ [2, 3] наибольший прирост дает трапецидальное (7%) и прямоугольные (7,3%). Из работ [3, 4] следует, что при использовании треугольных и клиновидных конфигурации оказывает меньшее влияния на изменение запасов ГДУ.

Целью данной работы является изучения влияния надроторного устройства лабиринтного типа разных конфигураций. В работе было рассмотрено влияние на компрессор среднего давления.

В ходе исследования НРУ трапецидального типа варьировались шаг ( $t$ ), высота ( $H$ ) и количество борозд ( $N$ ) для того, чтобы проследить влияние на ступень компрессора. Исходным вариантом был гладкая проточная часть осевого шестиступенчатого компрессора.

Базовым вариантом геометрии трапецидальных борозд принят вариант с параметрами шаг  $t = 11$  мм, высота  $H = 3$  мм и количество борозд  $N = 4$  шт (рис. 1). В ходе выполнения исследования трапецидальной конфигурации борозд параметры варьировались следующим образом: изменение шага 9, 11 и 13 мм; изменение высоты 2, 3 и 4 мм; изменение количества гребешков 3-4 шт.

Базовым вариантом геометрии прямоугольных борозд принят вариант с параметрами шаг  $t = 4$  мм, высота  $H = 4$  мм, количество борозд  $N = 8$  шт, угол наклона борозд  $\alpha = 90^\circ$  и ширина  $b = 4$  мм (рис. 2).

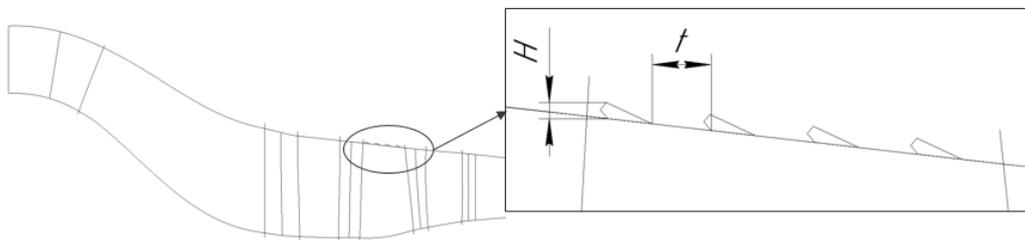


Рис. 1. Геометрия трапецидальных "борозд"

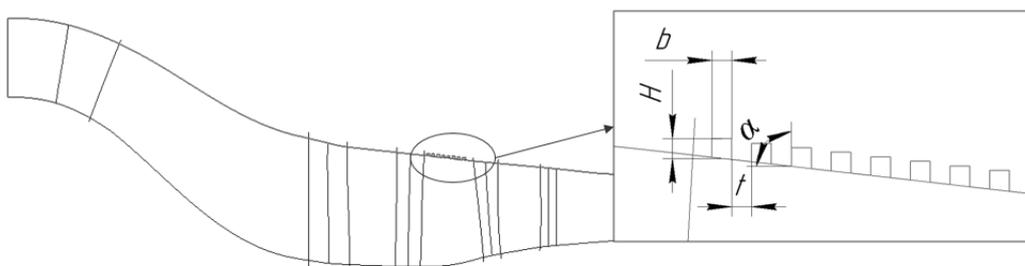


Рис. 2. Геометрия прямоугольных "борозд"

В ходе выполнения исследования прямоугольной конфигурации борозд параметры варьировались следующим образом: изменение шага 2, 4 и 8 мм; изменение высоты 4, 8 и 12 мм; изменение количества гребешков 4, 8 и 12 шт; изменение угла наклона борозд  $70^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $110^\circ$ .

Геометрия борозд была создана в программе КОМПАС v18. Расчетные исследования были выполнены в программном комплексе Numeca FineTurbo. В качестве рабочего тела была принята модель сухого воздуха [5]. Расчет производился в стационарной постановке с использованием модели турбулентности  $k-\epsilon$  (Extended Wall Function). Граничные условия на входе (полное давление и полная температура) задавались с помощью радиального распределения. Граничным условием на выходе является статическое давление. После проведения расчетов результаты сравнивались с вариантом компрессора, в котором борозды отсутствуют, были сделаны следующие выводы:

По итогам исследования влияния настроек трапецидальной конфигурации борозд на параметры ступени получены следующие результаты:

- снижение количества борозд с 4 до 3 штук приводит к увеличению запасов ГДУ на 2,14 %;
- изменение высоты борозды от 2 мм до 4 мм приводит к увеличению запасов ГДУ на 12% при снижении КПД на 0,11% относительно базового варианта;
- изменение шага между бороздами от 9 мм до 13 мм приводит к снижению запасов ГДУ на 0,8 % при увеличении КПД на 0,08%.

На следующем этапе выполнены исследования по определению оптимальной конфигурации прямоугольных борозд над рабочем колесом. По итогам выполненного исследования получены следующие результаты:

- изменение шага от 2 мм до 8 мм приводит к снижению запасов ГДУ на 1,06 % при увеличении КПД на 0,35 %;
- изменение высоты от 4 мм до 12 мм приводит к увеличению запасов ГДУ на 1 % при снижении КПД на 1,15 %;

– изменение ширины от 4 мм до 12 мм приводит к снижению запасов ГДУ на 10% при снижении КПД на 0,10 %;

– изменение угла наклона от 70° до 110° приводит к снижению запасов ГДУ на 11% при увеличении КПД на 0,16 %.

В результате выполненного исследования получено, что использование НРУ лабиринтного типа в общем случае приводит к повышению запасов ГДУ на 5,00-10,00% ступени при снижении КПД на 0,10-1,00% в зависимости от конфигурации.

### Библиографические ссылки

1. Холщевников К.В., Теория и расчёт авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холщевников. М : Машиностроение, 1970. 610 с.
2. Милешин В. И., Петровичев А. М., Жданов В.В. Расчетно-экспериментальное исследование влияния надроторных устройств лабиринтного типа на характеристики высоконагруженной первой ступени компрессора // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 58
3. Милешин В. И., Петровичев А. М., Жданов В.В. Расчетно-экспериментальное исследование влияния надроторных устройств лабиринтного типа на характеристики на замыкающей ступени // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 57
4. Chunill Nah Control of flow blockage generation thought casing treatments in a transonic axial compressor stage // Proceedings of ASME Turbo Expo 2020 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2020 September 21-25, 2020, Virtual, Online
5. Дорофеев В. М., Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.

### References

1. Holshchevnikov K. V. Teoriya i raschyot aviacionnyh lopatochnyh mashin [Theory and Calculation of Aircraft Blade Machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1970, 610 p.
2. Mileshin V.I., Petrovichev A M., Zhdanov V.V. [A numerical and experimental study of the effect of labyrinth-type casing treatment slots on the characteristics of a heavily loaded first stage compressor]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2019, No 58 (In Russ.).
3. Mileshin V. I., Petrovichev A M., Zhdanov V. V. [A numerical and experimental study of the effect of casing treatment slots of labyrinth type on the characteristics of the closing stage]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2019, No 57 (In Russ.).
4. Chunill Nah Control of flow blockage generation thought casing treatments in a transonic axial compressor stage. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2020*, 2020, Virtual, Online
5. 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., Тюрина Д. С., 2022

УДК 620.179.152.1

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗДЕЛИЙ РКТ ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ SLM-ПЕЧАТИ

Э. С. Манохина<sup>1\*</sup>, М. А. Шикарев<sup>1</sup>, А. П. Рубайло<sup>2</sup>, А. А. Фоменко<sup>1</sup>, В. В. Гордеев<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>Акционерное общество «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

\*E-mail: elka1232000@mail.ru

*В данном тезисе показаны рентгенографические исследования камеры-демонстратора изготовленного методом SLM-печати.*

*Ключевые слова: камера-демонстратор, SLM-печать.*

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF X-RAY STUDIES OF RCT PRODUCTS MANUFACTURED BY SLM PRINTING

E. S. Manokhina<sup>1\*</sup>, M. A. Shinkarev<sup>1</sup>, A. P. Rubailo<sup>2</sup>, A. A. Fomenko<sup>1</sup>, V. V. Gordeev<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>Joint-Stock Company “Krasnoyarsk Machine-building plant”

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

\*E-mail: elka1232000@mail.ru

*This thesis shows X-ray studies of a demonstrator camera made by SLM printing.*

*Keywords: camera-demonstrator, SLM-printing.*

SLM – инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D-печать металлом). С помощью SLM создают как точные металлические детали для работы в составе узлов и агрегатов, так и неразборные конструкции, меняющие геометрию в процессе эксплуатации [1].

Технология является методом аддитивного производства и использует мощные лазеры для создания трехмерных физических объектов. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям [3].

Изделие в соответствии с методом изготовления применяют рентгенографические методы исследования, камера-демонстратор РДМТ изготовлена из Inconel 718 методом SLM-печати на принтере предоставленном ООО «Полихром» [2].

Рентгенографический контроль – это один из методов неразрушающего контроля, направленного на проверку объектов с целью выявления дефектов, которые невозможно обнаружить при помощи визуального осмотра, то есть скрытых изъянов и нарушений структуры материала.

Данные исследования проводились на рентгеновском аппарате YXLON MG-103 (см. рисунок).

Была сделана разметка на несколько участков подверженному рентгенографическому контролю, было выявлено следующее:

При рентгенографическом исследовании образца, в зоне сопла выявлены несплошности в виде отдельных точечных пустот размерами 0,3...1 мм и вытянутых вдоль слоев печати кольцевых несплошностей интенсивностью ~ 0,1...0,2 мм, вероятно, являющимися структурой металла после печати, с ухудшением качества печати в районе критического сечения сопла и увеличением количества пустот размерами 0,5...2 мм. Но в зоне камеры выявлены несплошности в виде отдельных точечных пустот размерами 0,5...1,5 мм.



Разметка на камере-демонстраторе РДМТ

Металл на снимке представляет собой местами однородную структуру с наличием несплошностей описанных выше. Для повышения качества изделия необходима дальнейшая отработка режимов печати при различной геометрии поверхности наплавленного слоя.

#### Библиографические ссылки

1. Globatek.3D [Электронный ресурс] [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/slm-tech/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/) (дата обращения 09.09.2022)
2. Казаков Р. А., Фоменко А. А., Гордеев В. В., Бривкальн П. А., Дергач И. В. Разработка технологического процесса изготовления экспериментальной камеры ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления на 3D-принтере / Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VIII Междун. науч.-практ. конф.; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск 2022.
3. Эталон [Электронный ресурс] <https://etalon-rk.ru/laboratoriya-nerazrushayushhego-kontrolya/rentgenograficheskij-kontrol-rgk/> (дата обращения 09.09.2022)
4. Кулик В. И. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ: учебное пособие / В. И. Кулик, А. С. Нилов; Балт. Гос. Техн. Ун-н.-СПб., 2018-160с.
5. Жаропрочный сплав Инконель [Электронный ресурс]. URL: <http://saturn-sv.ru/inkonel> (дата обращения 09.09.2022)

#### References

1. Globatek.3D [Electronic resource] [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/slm-tech/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/) (accessed 09.09.2022)
2. Kazakov R. A., Fomenko A. A., Gordeev V. V., Brivkalin P. A., Dergach I. V. Development of a technological process for manufacturing an experimental chamber of a rocket engine using a selective laser fusion method on a 3D printer / Actual problems aviation and astronautics: materials of the VIII Intern. scientific-practical. conf.; Siberian State University M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk 2022.
3. Standard [Electronic resource] <https://etalon-rk.ru/laboratoriya-nerazrushayushhego-kontrolya/rentgenograficheskij-kontrol-rgk/> (accessed 09.09.2022)
4. Kulik V. I. ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURE OF PRODUCTS OF AVIATION AND ROCKET-SPACE TECHNOLOGY: tutorial / V. I. Kulik, A. S. Nilov; Balt. State. Tech. Univ.-SPb., 2018-160s.
5. Heat-resistant alloy Inconel [Electronic resource]. URL: <http://saturn-sv.ru/inkonel> (accessed 09.09.2022)

©Манохина Э. С., Шикарев М. А., Рубайло А. П., Фоменко А. А., Гордеев В. В., 2022

УДК 629.7.036.54

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЁТОМ ТЕПЛОВОГО И ПРОЧНОСТНОГО СОСТОЯНИЙ

С. А. Мельников, В. М. Зубанов, А. А. Харитоновна

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34  
Email: m.serg98@mail.ru

*Одной из важнейших систем жидкостного ракетного двигателя является система теплозащиты камеры, эффективность которой влияет на рабочие параметры двигателя. В работе подробно рассмотрен алгоритм проектирования оребрѐнного тракта регенеративного охлаждения.*

*Жидкостный ракетный двигатель, керосин, регенеративное охлаждение, оребрѐнный тракт регенеративного охлаждения, прочностной расчёт элемента камеры.*

## DESIGN OF REGENERATIVE COOLING OF A ROCKETING ENGINE CHAMBER TAKING INTO ACCOUNT THERMAL AND STRENGTH CONDITIONS

S. A. Melnikov, V. M. Zubanov, A. A. Kharitonova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
Email: m.serg98@mail.ru

*One of the most important systems of a liquid-propellant rocket engine is the chamber thermal protection system, the effectiveness of which affects the operating parameters of the engine. The paper considers the algorithm for designing a finned path for regenerative cooling.*

*Liquid propellant rocket engine, kerosene, regenerative cooling, finned regenerative cooling path, strength calculation of the chamber element.*

Проведѐн расчёт оребрѐнного тракта охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя второй ступени на компонентах топлива: керосин и жидкий кислород, тягой 1750 кН, с давлением в камере сгорания 14,5 МПа. Одномерная модель расчёта, позволила на этапе эскизного проекта определить тепловое состояние и геометрические параметры стенки и рубашки камеры из условия прочности и выбрать схему охлаждения, сравнивая результаты при различной высоте и ширине оребрѐнного тракта и положении подводящего коллектора.

В качестве материалов для проектируемой камеры были выбраны БрХ08 для стенки до узла коллектора подвода и Х16Н16 для всей рубашки и стенки после коллектора подвода.

Был выполнен расчёт проточного охлаждения камеры с гладким трактом охлаждения, предельная температура стенки камеры принята 800 К [2]. Корпус камеры был разбит на участки согласно рекомендациям [1]. Рассчитана величина плотности конвективного и лучистого теплового потока в стенку. Рассчитан подогрев керосина на участках. [2] Зависимости теплофизических свойств охладителя от температуры учитывались. [3] При расчёте подогрева учтено разделение расхода керосина и изменение высоты тракта охлаждения, обе эти величины могут варьироваться при использовании разработанного алгоритма. Принятая конечная схема разделения компонента в тракте охлаждения из условия ограничения рабочей температуры керосина температурой его разложения и минимизацией гидравлических потерь компонента в тракте охлаждения приведена на рис. 1.

Введѐн коэффициент эффективности оребрения  $\eta_{\text{с}}$ , чтобы учесть отличие коэффициента теплоотдачи оребрѐнной стенки от гладкой. В процессе расчёта учитывалась связь изменения коэффициента теплоотдачи и изменение конвективного теплового потока, а также температуры охладителя. Минимальная ширина канала в оребрѐнном тракте принята 1,5 мм, максимальная рассчитана из условия прочности для каждого сечения. На рис. 2 приведены результаты итерационного расчёта температу-

ры стенки, рубашки и охлаждающего компонента для оребрѐнного тракта охлаждения, также приведена температура применяемого теплоизолирующего покрытия  $ZrO_2$ .

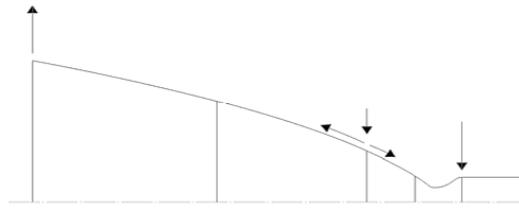


Рис. 1. Схема течения керосина по тракту регенеративного охлаждения камеры сгорания

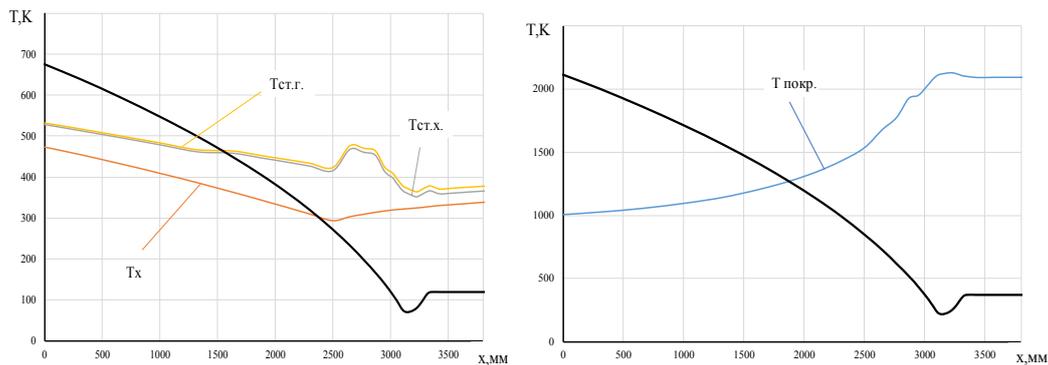


Рис. 2. Температуры охлаждающего компонента в щелевом тракте охлаждения ( $T_{ст.г.}$  – температура стенки камеры с внутренней поверхности камеры,  $T_{ст.х.}$  – температура стенки камеры в тракте охлаждения,  $T_x$  – температура хладогента (керосина) в тракте охлаждения,  $T_{покр.}$  – температура покрытия из двуокиси циркония  $ZrO_2$ .)

После расчёта оребрѐнного тракта охлаждения определены величины гидравлических потерь в оребрѐнном тракте, необходимый для общего расчёта стенки и рубашки камеры на прочность. Задавшись коэффициентом запаса по текучести, получено выражение для толщины рубашки камеры  $h_p$ , в первом приближении толщина стенки камеры принята 1 мм. Найдена величина осевой силы для каждого сечения камеры. По известным величинам осевой силы, давления и геометрических параметров в каждом сечении камеры была определена величина меридиональной и окружной погонных сил  $N_x$  и  $N_y$ , а также толщина рубашки  $h_p$ . [1]. По длине камеры толщина рубашки изменяется для разных секций.

По результатам расчёта теплового состояния стенок и рубашки камеры, расчёта гидравлических потерь в оребрѐнном тракте и расчёта прочности корпуса камеры был выполнен проверочный тепловой и прочностной расчёт в программе Ansys Workbench 15. Результаты приведены на рис. 3 и в табл. 1.

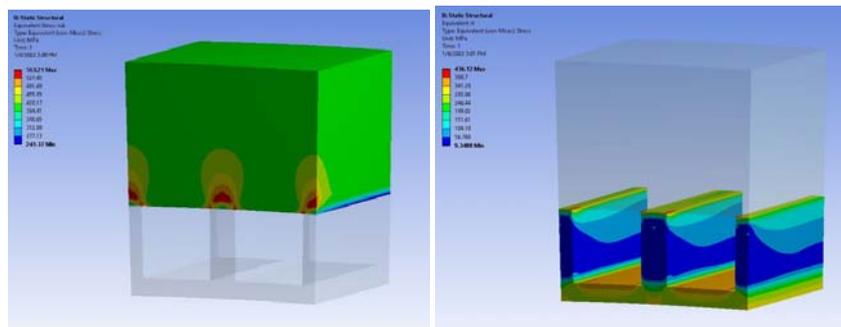


Рис. 3. Результат прочностного расчёта элемента рубашки и стенки в программе Ansys Workbench

## Результат прочностного расчёта элемента камеры

	Расчёт в Ansys Workbench 15, напряжения в детали			Аналитический расчёт	Предел текучести	Коэффициент запаса по пределу текучести
	$\sigma_{max}$ , МПа	$\sigma_{min}$ , МПа	$\sigma_{ср\ ansys}$ , МПа	$\sigma_{ср\ an}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$n = \sigma_T / \sigma_{ср}$
Стенка	436	9,3	174,5	-	220	1,26
Рубашка	563	241	399,5	402,2	600	1,5

Выполнен аналитический расчёт приближённым методом, в котором использовалась безмоментная теория оболочек, при которой напряжения по толщине стенки считаются постоянными. [5] Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Расчёт в программном комплексе Ansys Workbench 15 качественного воспроизвёл результаты расчёта по методике на основе пособия [5]. В работе сформулирован алгоритм и по нему спроектирована система регенеративного охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя.

## Библиографические ссылки

1. Пичугин, Д.Ф. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: учеб, пособие/ Пичугин Д.Ф. – Куйбышев: Изд-во Авиационного института, 1989. 244 с.
2. Борисов, В.А. Основы конструирования ракетных двигателей: учеб. пособие/ Борисов В.А.– Самара: Изд-во Самар. Гос. Аэрокосм. ун-та, 2007, 98 с.
3. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: справочник/ Варгафтик, Н.Б. Издательство «Наука», М., 1972, 720 с.
4. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей / М.С. Штехер. М.: Машиностроение, 1976, 301 с.
5. Сопряженное моделирование тепловых, гидродинамических и прочностных процессов в системе охлаждения камеры ЖРД / Н. В. Безменова, В. А. Борисов, А. Ю. Тисарев, С. А. Шустов, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева – Самара, 2013, 126 с.

## References

1. Pichugin D.F. *Konstrukciya i proektirovaniye dvigateley letatelnih apparatov* [Construction and design of aircraft engines]: textbook / Pichugin D.F. – Kuybishev: Aircraft Institute Publ., 1989, 244 p.
2. Borisov, V.A. *Osnobi konstruirovaniya raketnih dvigateley* [Basics of rocket engine design]: textbook/ Borisov, V.A. Samara: Samara Aerospace University Publ., 2007, 98 p.
3. Vargaftic, N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermo-physical properties of gases and liquids]: handbook/ Vargaftic, N.B.- Nauka Publ, M., 1972, 720 p.
4. Shtecher M.S. *Topliva i rabochiye tela raketnih dvigateley* [Fuels and working fluids of rocket engines] / Moscow.: Mechanical Engineering, 1976, 301 p.
5. *Sopryagonnoe modelirovaniye teplovih, gidravlicheskih i prochnosnih processov v sisteme okhlazdeniya kameri ZHRD* [Conjugate modeling of thermal, hydrodynamic and strength processes in the cooling system of the LRE chamber] / N. V. Bezmenova, V. A. Borisov, A. Yu. Tisarev, S. A. Shustov, Samara AeroSpace University, 2013, 126 p.

© Мельников С. А., Зубанов В. М., Харитонов А. А., 2022

УДК 621.453

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

В. П. Назаров<sup>1\*</sup>, В. Ю. Пиунов<sup>2</sup>, К. Ф. Голиковская<sup>1</sup>, Л. П. Назарова<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>АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»  
Российская Федерация, 141402, Московская область, г. Химки, Ленинградская ул., д. 24

\*E-mail: nazarov@mail.sibsau.ru

*Рассматриваются особенности оценивания надежности стендовых испытаний, имитирующих воздействие физических условий космического пространства, учитывающих применение диагностических методов и специальной аппаратуры для проведения различных физических исследований и измерений.*

*Ключевые слова: жидкостные ракетные двигатели малой тяги, стендовые испытания*

## SIMULATION MODELING OF BENCH TEST CONDITIONS OF LIQUID ROCKET ENGINES OF LOW-THRUST

V. P. Nazarov<sup>1\*</sup>, V. Yu. Piunov<sup>2</sup>, K. F. Golikovskaya<sup>1</sup>, L. P. Nazarova<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>NPO imeni S. A. Lavochkina  
24, Leningradskaya str., Khimki, 141402, Moscow region, Russian Federation

\*E-mail: nazarov@mail.sibsau.ru

*Peculiarities of evaluating the reliability of bench tests simulating the impact of the physical conditions of outer space, taking into account the use of diagnostic methods and special equipment for various physical studies and measurements, are considered.*

*Keywords: low-thrust engines, bench tests*

В процессе экспериментальной отработки ЖРДМТ большое внимание уделяется вопросам методологии стендовых испытаний, техническому оснащению стендов, имитирующих воздействие физических условий космического пространства, а также применению диагностических методов и аппаратуры для проведения различных физических исследований и измерений.

Эффективность наземной (стендовой) отработки обеспечивается имитацией условий натуральных испытаний и учетом влияния всех эксплуатационных факторов, воздействующих на достоверность оценки показателей надежности при конструкторской отработке в наземных условиях. Особое место в вопросах достижения эффективности испытаний занимают требования по обеспечению точности и достоверности результатов испытаний. Значительный объем испытаний при отработке двигателей следует проводить в условиях требуемого вакуума на стендах, оборудованных барокамерами с вакуумными системами [1-2].

В результате отказов некоторых элементов сложной стендовой системы ухудшается качество функционирования и снижается вероятность успешного выполнения функций, определяющих выходной эффект системы.

Поэтому задача оценки надежности систем стенда для огневых испытаний ракетных двигателей сводится к выяснению влияния отказов элементов на качество функционирования и выходной эффект каждой системы. При проведении испытаний заданные условия должны однозначно определять технические характеристики испытательного стенда, в том числе барокамеры и вакуумного оборудования. Испытания должны проходить с достаточной степенью достоверности [3]. Динамические процессы, возникающие в топливных магистралях подачи компонентов топлива, зависят от многих

факторов, определяемых свойствами компонентов топлива, пневмогидросхемой и циклограммой работы ЖРДМТ. Известно [4], что характер динамических процессов в магистралях оказывает существенное влияние на параметры двигателя, что для ЖРДМТ является особо актуальным, так как работа в импульсных режимах, вызывающих динамические процессы, является одной из наиболее типичных особенностей работы таких двигателей. Поэтому для достоверного определения характеристик двигателя во время испытаний необходимо обеспечить соответствие динамических процессов, возникающих в стендовых магистралях, процессам, возникающим в подводящих топливных магистралях в двигательных установках с ЖРДМТ.

Рассмотрены методы обеспечения динамического подобия характеристик систем питания двигателя компонентами топлива на стенде и в составе двигательной установки космического аппарата, в том числе соответствие гидравлических, инерционных и волновых характеристик магистралей [5-6]. Проведен анализ погрешностей результатов испытаний.

Сформулированы задачи методики расчета инструментальных погрешностей. Проведена оценка частотных характеристик стендовых гидравлических магистралей. Разработаны рекомендации по повышению точности измерения параметров при проведении стендовых огневых испытаний ЖРД малой тяги. Научно обоснованная и экспериментально проверенная методика оценки точности измерений способствует достоверности результатов испытаний.

### Библиографические ссылки

1. Назаров В. П., Пиунов В. Ю., Яцуненко В. Г., Савчин Д. А. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Сибирский аэрокосмический журнал, Красноярск, 2021. Том 22, № 2. С. 339-354.
2. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / Е.В. Лебединский [и др.]; под ред. А.С. Коротева. – М.: Машиностроение, 2008. -512 с.
3. Галеев А. Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок: руководство для инженеров-испытателей. Пересвет: Изд-во ФКП “НИЦ РКП”, 2010. 178 с.
4. Experimental Demonstration of the Vacuum Specific Impulse of a Hybrid Rocket Engine. J. Lestrade, O. Verberne, G. Khimeche и др. // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, 2014.
5. Веселов А. В. Модернизация тягоизмерительного устройства на испытательных стендах жидкостных ракетных двигателей // Решетневские чтения: материалы XXII Междунар. науч. практ. конф. (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 198–200.
6. Краев М. В., Яцуненко В. Г. Измерения параметров при огневых испытаниях жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Вестник СибГАУ. 2004. № 5. С. 167–172.

### References

1. Nazarov V. P., Piunov V. Yu., Yatsunenkov V. G., Savchin D. A. Characteristics of low thrust liquid-propellant rocket engines testing process. Siberian Aerospace Journal. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 339–354.
2. Lebedinskiy E. V. Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ikh modelirovanie pod red. A. S. Koroteeva [Working processes in liquid propellant rocket engines and their modelling edited by A. S. Koroteev]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 512 p
3. Galeev A. G. Fundamentals of the design of test benches for testing of liquid rocket engines and propulsion systems manual for test engineers. Peresvet: Izd-vo FKP “NIC RKP”, 2010. 178 s.
4. Lestrade J., Verberne O., Khimeche G. et. al. Experimental Demonstration of the Vacuum Specific Impulse of a Hybrid Rocket Engine. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, 2014.
5. Veselov A. V. [Modernization of the load-measuring device on the test benches of liquid rocket engines]. Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf. (12-16 noyabrya 2018, g. Krasnoyarsk) v 2 ch. [International science and research conference (in memory of the Mikhail Fedorovich Reshetnev, general constructor of space vehicles and rocket systems)]. Krasnoyarsk, 2018, P. 198–200.
6. Kraev M. V., Yatsunenkov V. G. [Measurements during firing tests of low thrust liquid propellant rocket engines]. Vestnik SibGAU. 2004, Vol. 5, P. 167–172.

УДК 629.7.036.3

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОТБОРА ВОЗДУХА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

Ю. Д. Новикова\*, С. А. Мельников, А. Ю. Доценко

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34  
\*E-mail: y.d.novikova@gmail.com

*В данной работе исследовано влияние величины отбора воздуха, используемого в качестве механизма регулирования трехступенчатого осевого компрессора, с целью использования его в качестве пневмотормоза в процессе испытаний турбовальных двигателей.*

*Ключевые слова: турбовальный двигатель, пневмотормоз, трехступенчатый осевой компрессор, газодинамические характеристики, мощностные характеристики.*

## INFLUENCE OF THE AIR BLEEDING ON THE GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE AXIAL COMPRESSOR

Yu. D. Novikova\*, S. A. Melnikov, A. Yu. Docenko

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe Shosse Str., Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: y.d.novikova@gmail.com

*This paper describes the study of influence of the air bleeding on the gas-dynamic characteristics. Air bleeding is used as a compressor control tool. Three-stage axial compressor is supposed to be used as an air brake during testing of turboshaft engines*

*Keywords: turboshaft engine, air brake, three-stage axial compressor, gas dynamic characteristics, power characteristics.*

Каждый авиационный двигатель пройдя этапы проектирования, конструирования и изготовления подвергается испытаниям. Испытания турбовальных двигателей (ТВД) необходимы для того, чтобы убедиться в том, что показатели нового двигателя или двигателя прошедшего ремонт соответствуют заявленным или превышают обязательные требования для безопасной эксплуатации воздушного судна. В некоторых случаях появляется необходимость испытывать ТВД в короткие сроки перед их повторной установкой, чтобы обеспечить безопасность пилотов и экипажа. Для этого применяют мобильные воздушные тормоза [1, 2]. Помимо мобильности пневматические тормозные устройства имеют ряд преимуществ:

- работают в широком спектре климатических условий (при сильной жаре/холоде, в засушливой или влажной среде);
- имеют существенно меньшие габариты по сравнению с гидротормозами;
- не загрязняют окружающую среду (нет потребности в очистке воды);
- просты в эксплуатации и обслуживании.

К существенному недостатку пневмотормозов можно отнести высокую стоимость проектирования и изготовления компрессоров, лежащих в их основе. Однако для газотурбинной техники распространена практика изготовления новых устройств на базе существующих и имеющих налаженный процесс изготовления [3, 4]. Это позволяет существенно сократить сроки и стоимость создания нового устройства. Но зачастую существующую конструкцию компрессора необходимо модифицировать для применения в качестве пневмотормоза. Одной из проблем является отсутствие механизмов регулирования компрессора в процессе испытаний. В данной работе исследовано влияние величины отбора воздуха, используемого в качестве механизма регулирования трехступенчатого осевого компрессора, на его характеристики.

В качестве объекта исследования был выбран трехступенчатый осевой компрессор. Отбор воздуха был выполнен за первой ступенью компрессора (рис.1). Для проведения численной симуляции рабочего процесса в компрессоре был выбран коммерческий программный продукт NUMECA Fine/Turbo [5]. Для расчёта была сформирована компьютерная геометрическая модель интересующей области течения рабочего тела. Расчётная симуляция была выполнена для базовой конфигурации компрессора и для двух вариантов с отбором воздуха в размере 5 и 10 % от общего расхода рабочего тела.

На основе результатов расчёта численной модели были построены характеристики в виде зависимостей  $\pi_K^* = f(G_{В\text{ вых}})$ ,  $\eta_K^* = f(G_{В\text{ вых}})$  и  $N_K = f(G_{В\text{ вых}})$  при различных значениях частоты вращения ротора ( $n = 92\%$ ,  $100\%$  и  $110\%$ ). Сравнение характеристик базового компрессора и компрессора с отбором воздуха за первой ступенью приведено на рис. 2.



Рис. 1. Схема исследуемого трехступенчатого осевого компрессора

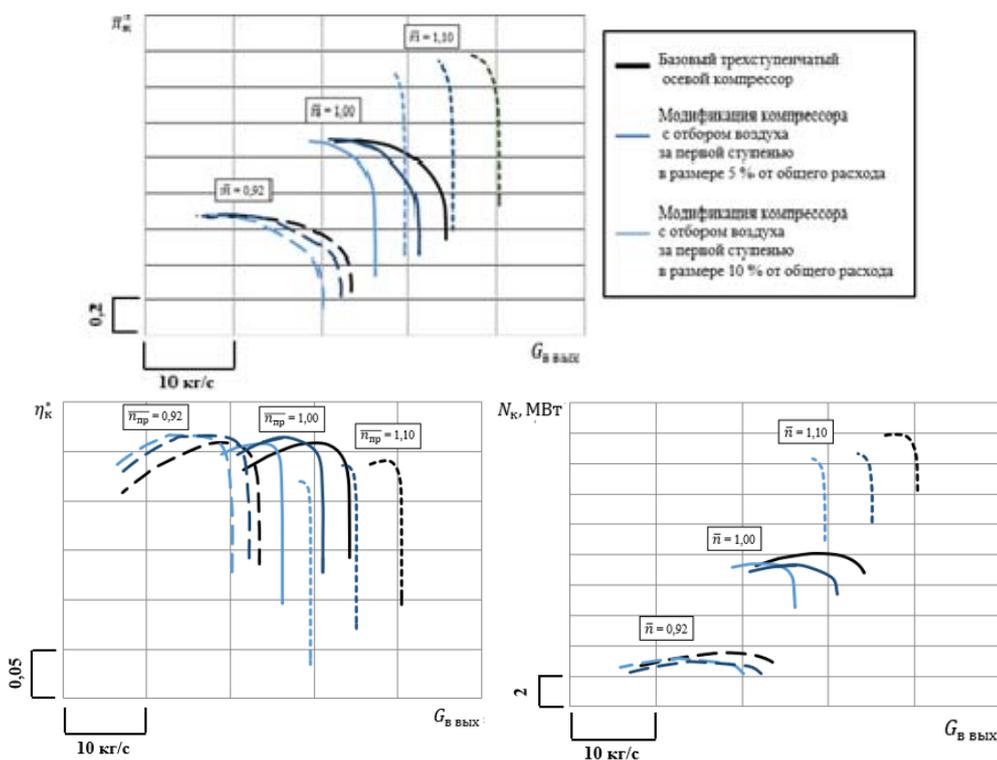


Рис. 2. Мощностные характеристики трехступенчатого осевого компрессора и двух вариантов его модификации

Из анализа рис. 2 видно, что в результате введения отбора воздуха незначительно изменилась максимальная степень повышения давления осевого компрессора. При этом КПД для режимов  $n = 92\%$  и  $100\%$  остался на прежнем уровне, а для режима  $n = 110\%$  снизился. В связи с этим можно наблюдать схожую картину: максимальная мощность компрессора для режимов  $n = 92\%$  и  $100\%$  снизилась незначительно, для режима  $n = 110\%$  аналогично КПД произошло существенное снижение мощности.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что для исследуемого трехступенчатого осевого компрессора введение отбора воздуха в размере 5 и 10 % за первой ступенью приводит к незначительному уменьшению мощности для режимов  $n = 92\%$  и  $100\%$  и существенному уменьшению (порядка 3 МВт) для режима  $n = 110\%$ .

#### Библиографические ссылки

1. Jet Engine Dynamometers [Электронный ресурс]. URL: <https://www.conceptsnrec.com/dynamometers> (дата обращения: 10.09.2022).
2. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS 345 E. 47 St., New Your, N.Y. 10017 [Электронный ресурс]. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.933.3257&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 10.09.2022).
3. Рассохин В. А. Проектирование ГТД на базе универсального газогенератора малой размерности / Рассохин В. А., Шарова Н. А. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. №3(19). с. 241 – 248.
4. Способ испытания газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления: пат.2318195 Рос.Федерация: МПК G01M 15/14 /М.В.Коротов, заявитель и патентообладатель ОАО Самарский научно-технический комплекс им. Н.Д.Кузнецова. №2001127609/06; заявл. 10.10.01; опубл. 20.06.03, Бюл.№6. 9 с.: ил.
5. NUMECA International: сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.numeca.com> (дата обращения: 10.09.2022).

#### References

1. Jet Engine Dynamometers. Available at: <https://www.conceptsnrec.com/dynamometers> (accessed: 10.09.2022).
2. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS 345 E. 47 St., New Your, N.Y. 10017. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.933.3257&rep=rep1&type=pdf> (accessed: 10.09.2022).
3. Rassokhin V. A. Designing a gas turbine engine based on a universal gas generator of small dimension / Rassokhin V. A., Sharova N. A. // Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2009. No. 3 (19). With. 241–248.
4. A method for testing a gas turbine engine and a device for its implementation: Pat. 2318195 Ros. Federation: IPC G01M 15/14 / M.V. No. 2001127609/06; dec. 10.10.01; publ. 06/20/03, Bull. No. 6. 9 p.: ill.
5. NUMECA International. Available at: <https://www.numeca.com> (accessed: 10.09.2022).

© Новикова Ю. Д., Мельников С. А., Доценко А. Ю., 2022

УДК 629.7.03

## ВЫСОТНАЯ КОРРЕКЦИЯ ДВИГАТЕЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

М. А. Рутковская<sup>1</sup>, В. О. Рутковский<sup>2\*</sup>, О. И. Насибуллин<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 «СИМУРГ»  
Российская Федерация, 660077, г. Красноярск, Авиаторов, 1

\*E-mail: jbiplane@gmail.com

*Электронные блоки управления для систем впрыска имеют упрощённую высотную коррекцию. Предполагается, что мощность двигателя пропорциональна плотности окружающего воздуха вне зависимости от конструкции конкретного двигателя. Авторами статьи был сконструирован стенд для настройки кривой высотной коррекции двигателей БПЛА.*

*Ключевые слова: впрыск топлива, электронный блок управления ДВС, топливная экономичность, высотная коррекция*

### UAV ENGINE ALTITUDE CORRECTION

M. A. Rutkovskaya<sup>1</sup>, V. O. Rutkovskiy<sup>2\*</sup>, O. I. Nasibullin<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>SIMURG LLC  
1, Aviatorov Str., Krasnoyarsk, 660077, Russian Federation

\*E-mail: jbiplane@gmail.com

*Electronic control units for injection systems have simplified altitude correction. It is assumed that the engine power is proportional to the ambient air density regardless of the design of the particular engine. The authors of the article designed a stand for adjusting the curve of altitude correction of UAV engines.*

*Keywords: fuel injection, engine control unit, fuel efficiency, altitude correction*

Как известно, для полного сгорания топлива в бензиновых двигателях внутреннего сгорания необходимо обеспечить правильную пропорцию воздуха и топлива. Это относительное число принято называть лямбда [1-3]. С повышением высоты полёта количество воздуха, поступающего в двигатель, существенно уменьшается. Для отработки высотной коррекции был сконструирован и изготовлен испытательный стенд. Стенд содержит вакуумный насос с ресивером. На дроссельную заслонку одевается штуцер со шлангом, подключенный к ресиверу. При испытаниях и настройке двигателя в дроссельную заслонку (рис. 1) поступает разреженный воздух из вакуумного ресивера.

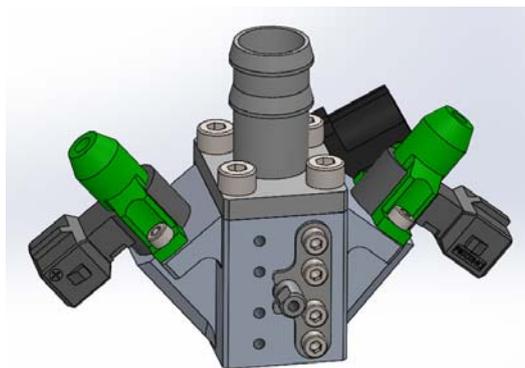


Рис. 1. Дроссельная заслонка с присоединённым вакуумным штуцером

К ресиверу подключен штуцер с регулируемым клапаном для постоянной подачи в ресивер воздуха вместо израсходованного двигателем. К вакуумному ресиверу также подключен датчик атмосферного давления электронного блока управления. Автоматика стенда следит за постоянством задаваемого пользователем уровня вакуума, соответствующего таблице стандартного атмосферного давления [4]. Настройка производилась до давления 354,13 мм ртутного столба или 47213,46 Па соответствующего высоте 6000 метров над уровнем моря. Шаг изменения высоты составлял 500 метров (0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 и 6000 метров).

На каждом из давлений производилась коррекция топливной высотной кривой (рис. 2) до заданного ранее соотношения воздух топливо при заданных крейсерских оборотах двигателя. Дальнейшим развитием данной работы могло бы послужить создание вместо высотной кривой корректирующей поверхности с учетом степени открытия дроссельной заслонки.

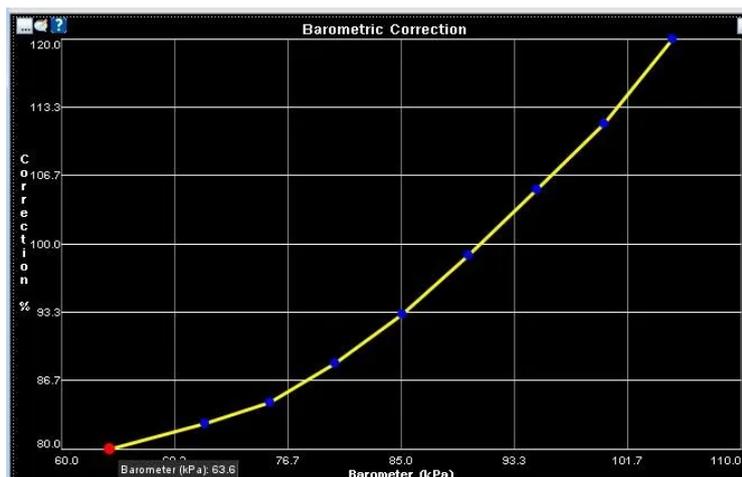


Рис. 2. Результирующая кривая коррекции топлива в зависимости от высоты полёта для 4-тактного двигателя OS GF40

При использовании разработанного стенда возможно имитировать работу двигателя на больших высотах над уровнем моря. Натурные испытания в полете подтвердили правильность настроек двигателя на испытательном стенде.

### Библиографические ссылки

1. Matt Cramer, Jerry Hoffmann. Performance Fuel Injection Systems HP1557: How to Design, Build, Modify, and Tune EFI and ECU Systems, HP Books, 2010. 160 p.
2. Speeduino Manual [Электронный ресурс]. URL: <https://wiki.speeduino.com/ru/home> (дата обращения: 07.09.2022).
3. Уайт Ч. Системы управления и впрыск топлива. Руководство. СПб. : Изд-во: Алфамер, 2006. 320 с.
4. Таблица стандартной атмосферы [Электронный ресурс]. URL: [https://aviatus.ru/parachuting/devices/ppk/table\\_of\\_standard\\_atmosphere](https://aviatus.ru/parachuting/devices/ppk/table_of_standard_atmosphere) (дата обращения: 07.09.2022).

### References

1. Matt Cramer, Jerry Hoffmann. Performance Fuel Injection Systems HP1557: How to Design, Build, Modify, and Tune EFI and ECU Systems, HP Books, 2010. 160 p.
2. Speeduino Manual [Electronic resource]. URL: <https://wiki.speeduino.com/ru/home> (access: 07.09.2022).
3. Yait Ch. *Sistimi upravleniya i vprisk topliva. Rukovodstvo* [Control systems and fuel injection. Manual]. SPb. : Publ: Alfamer, 2006. 320 p.
4. Standard atmosphere table [Electronic resource]. URL: [https://aviatus.ru/parachuting/devices/ppk/table\\_of\\_standard\\_atmosphere](https://aviatus.ru/parachuting/devices/ppk/table_of_standard_atmosphere) (access: 07.09.2022).

© Рутковская М. А., Рутковский В. О., Насибуллин О. И., 2022

УДК 629.7.03

## ДРОССЕЛЬНАЯ ЗАСЛОНКА С ДВУМЯ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ФОРСУНКАМИ

В. О. Рутковский<sup>1\*</sup>, О. И. Насибуллин<sup>1</sup>, М. А. Рутковская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью «СИМУРГ»  
Российская Федерация, 660077, г. Красноярск, Авиаторов 1

<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: jbiplane@gmail.com

*Обычно двигатели внутреннего сгорания, которые имеют общую дроссельную заслонку используют также одну топливную форсунку. Предлагается применение двух форсунок различной производительности для улучшения топливной экономичности и повышения надёжности за счёт дублирования компонентов.*

*Ключевые слова: впрыск топлива, электронный блок управления ДВС, дублирование, топливная экономичность*

## THROTTLE BODY WITH TWO INTEGRATED NOZZLES

V. O. Rutkovskiy<sup>1\*</sup>, O. I. Nasibullin<sup>1</sup>, M. A. Rutkovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SIMURG LLC

1, Aviatorov Str., Krasnoyarsk, 660077, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: jbiplane@gmail.com

*Internal combustion engines that have common throttle body for all cylinders use only one fuel nozzle. We propose to use two nozzles of different performance to improve fuel efficiency and increase reliability due to duplication of components.*

*Keywords: fuel injection, engine control unit, redundancy, fuel efficiency*

Как известно, для полного сгорания топлива в бензиновых двигателях внутреннего сгорания необходимо обеспечить правильную пропорцию воздуха и топлива. Это относительное число принято называть лямбда. На рис. 1 [1-3] показано влияние качества топливной смеси на работу двигателя. Если состав смеси отличается от идеального, то смесь называют бедной или богатой. В результате применения бедной смеси двигатель не развивает полной мощности, его детали имеют повышенную температуру из-за худшего внутреннего охлаждения, при высоких температурах масло практически полностью сгорает, что приводит к повышению опасности задира пары поршень-цилиндр и риску прогара поршня. Богатые смеси приводят к повышенному расходу и повышенному образованию нагара на поршнях и в цилиндрах. Поэтому важной задачей является обеспечение качества топливной смеси во всём диапазоне оборотов ДВС.

Двигатели внутреннего сгорания, которые имеют общую дроссельную заслонку используют также одну топливную форсунку. Из-за физических ограничений подобная форсунка рассчитана на один номинальный режим работы. На высоких оборотах производительности форсунки недостаточно и смесь становится бедной. На низких оборотах форсунка не может открываться и закрываться слишком быстро и каждый впрыск поступает большее количество топлива, чем необходимо.

Авторами данной статьи разработана и испытана конструкция дроссельной заслонки с двумя интегрированными топливными форсунками одинаковой геометрической размерности, но различной производительности (рис. 2).

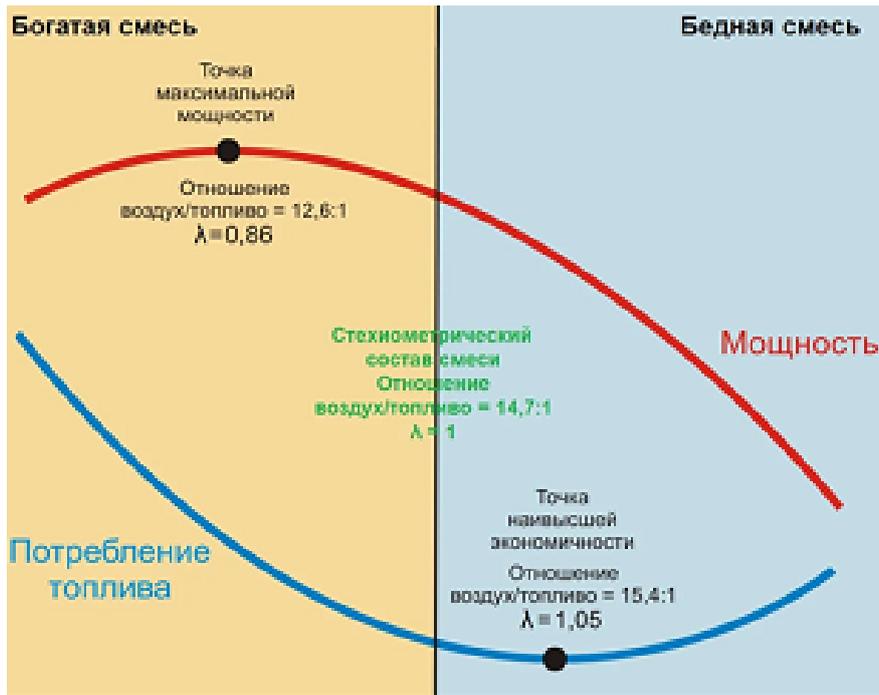


Рис. 1. Качество топливной смеси для бензина марки АИ95

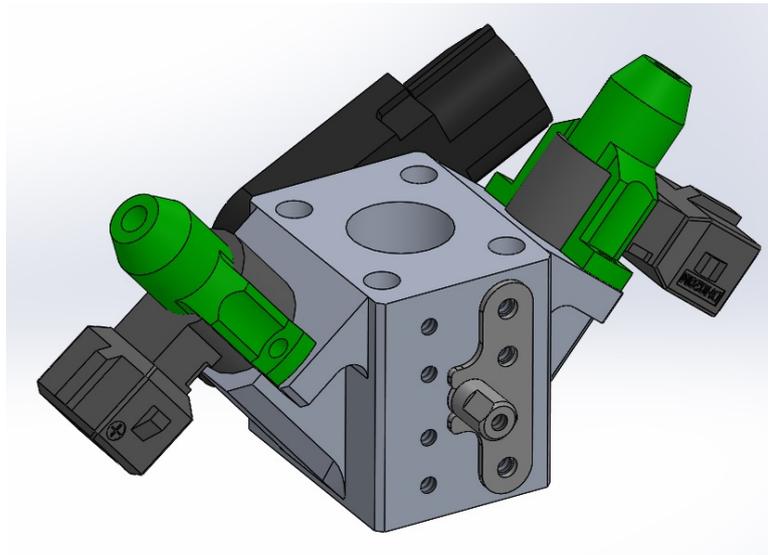


Рис. 2. Дроссельная заслонка с двумя интегрированными топливными форсунками

Статической производительностью форсунки называется количество топлива, разбрызгиваемого форсункой при её непрерывном полном открытии в течении 60 секунд. В предлагаемом решении одна из форсунок имеет относительно малую производительность, вторая приблизительно в два раза большую. При запуске двигателя, для обеспечения легкого запуска, работают обе форсунки. При работе от холостых оборотов до заданных минимальных крейсерских (например, 40 % от максимальных) работает только малая форсунка. При оборотах от 40 до задаваемых максимальных крейсерских (например, 70 % от максимальных) работает только большая форсунка. При оборотах от минимальных до максимальных крейсерских работают обе форсунки. Подобное техническое решение в большинстве случаев позволяет дополнительно экономить порядка 6 % топлива относительно системы с

общей дроссельной заслонкой и одной форсункой. Повышается также общая надежность топливной системы. При выходе из строя большой форсунки двигатель может работать на малой частоте вращения, до крейсерских оборотов. При выходе из строя малой форсунки двигатель может работать во всем диапазоне рабочих оборотов при повышенном расходе топлива на оборотах менее 50 % от максимальных и до приблизительно 85 % от максимальных. Допускается периодическая, кратковременная (порядка 60 секунд) работа двигателя на большой форсунке для осуществления маневра. При этом форсунка полностью открыта. В обоих случаях осуществляется переключение форсунок на так называемые аварийные топливные карты. В настоящее время правильная работа системы с двумя форсунками обеспечивается только при применении реперного диска с отсутствующим зубом для постоянного анализа неравномерности частоты вращения коленчатого вала. При необходимости еще большей надёжности каждая форсунка комплектуется собственным независимым электронным блоком управления и индивидуальным топливным насосом.

В результате произведенных испытаний была подтверждена дополнительная топливная экономичность при малых и средних оборотах, а также надежная работа двигателя во всём диапазоне открытия дроссельной заслонки при принудительном отключении любой из двух топливных форсунок.

### Библиографические ссылки

1. Matt Cramer, Jerry Hoffmann. Performance Fuel Injection Systems HP1557: How to Design, Build, Modify, and Tune EFI and ECU Systems, HP Books, 2010. 160 p.
2. Speeduino Manual [Электронный ресурс]. URL: <https://wiki.speeduino.com/ru/home> (дата обращения: 07.09.2022).
3. Уайт Ч. Системы управления и впрыск топлива. Руководство. СПб. : Изд-во: Алфамер, 2006. 320 с.

### References

1. Matt Cramer, Jerry Hoffmann. Performance Fuel Injection Systems HP1557: How to Design, Build, Modify, and Tune EFI and ECU Systems, HP Books, 2010. 160 p.
2. Speeduino Manual [Electronic resource]. URL: <https://wiki.speeduino.com/ru/home> (access: 07.09.2022).
3. Yait Ch. *Sistimi ypravleniya i vprisk topliva. Rukovodstvo* [Control systems and fuel injection. Manual]. SPb. : Publ: Alfamer, 2006. 320 p.

© Рутковский В. О., Насибуллин О. И., Рутковская М. А., 2022

УДК 621.454:004.9-027.33

## ПОСТОБРАБОТКА КАМЕРЫ-ДЕМОНСТРАТОРА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ SLM-ПЕЧАТИ

И. А. Фесенко, И. В. Дергач, П. А. Бривкальн, Р. А. Казаков, 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: irino4ka1710@mail.ru

*В работе рассмотрены необходимые этапы постобработки камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленной методом 3D-печати из инконеля.*

*Ключевые слова: инконель, электрополировка, закалка, аддитивные технологии, абразивная обработка.*

## POST-PROCESSING OF THE CAMERA-DEMONSTRATOR OF A LOW-THRUST ROCKET ENGINE MADE USING SLM-PRINTING TECHNOLOGY

I. A. Fesenko, I. V. Dergach, P. A. Brivkaln, R. A. Kazakov, V. P. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: irino4ka1710@mail.ru

*The paper considers the necessary stages of post-processing of a low-thrust rocket engine demonstrator camera, made by 3D printing from Inconel.*

*Keywords: inconel, electropolishing, hardening, additive technologies, abrasive processing.*

К изделиям в ракетно-космической отрасли предъявляются повышенные требования по качеству и надежности. Применение аддитивных технологий (АТ) позволяет существенно снизить объем обработки изделия, по сравнению с традиционным производством.

После печати камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) на 3D принтере необходимо устранить остаточные напряжения и получить однородную мартенситную структуру материала посредством закалки [1].

Закалка камеры-демонстратора производилась с использованием сертифицированной вакуумной печи АО «Красмаш» с разработанным режимом обработки. Закалка осуществлялась с нагревом в несколько этапов при вакууме и с последующим остыванием в печи. Режим закалки представлен в таблице и на рисунке.

Параметры режима закалки

Этап	1	2	3	4	5	6
Температура, °С	250	500	750	1060	500	50
Время выдержки, мин	1	1	5	60	10	10
Вакуум, мбар	$5 \times 10^{-3}$					

В результате закалки цвет изделий изменился с серого на темно серый.

Нежелательными особенностями текстуры поверхности деталей, полученных в процессе аддитивного производства, являются ступенчатость, адгезия порошка, узоры, отпечатки после удаления подерживающего материала [2]. Для удаления этих дефектов были произведены операции:

- абразивная обработка;
- электрохимическое полирование.

При абразивной обработке использовался искусственный абразив – электрокорунд F-120. Абразив подавался в камеру с изделием под давлением 4 кгс/см<sup>2</sup>.

Электрохимическое полирование представляет собой анодную обработку металла для создания ровной и блестящей поверхности [3]. На качество электрополировки влияют: напряжение; сила тока рассчитывается исходя из площади поверхности, обрабатываемого изделия; выбор электролита и время проведения обработки. Обработка проводилась в катодно-анодной ванне электрохимического полирования с раствором  $H_2SO_4$  (серной кислоты),  $H_3PO_4$  (фосфорной кислоты) и  $CrO_3$  (хромового ангидрида). Параметры обработки: время – 4 минуты; напряжение – 8,8 В; сила тока – 41 А.

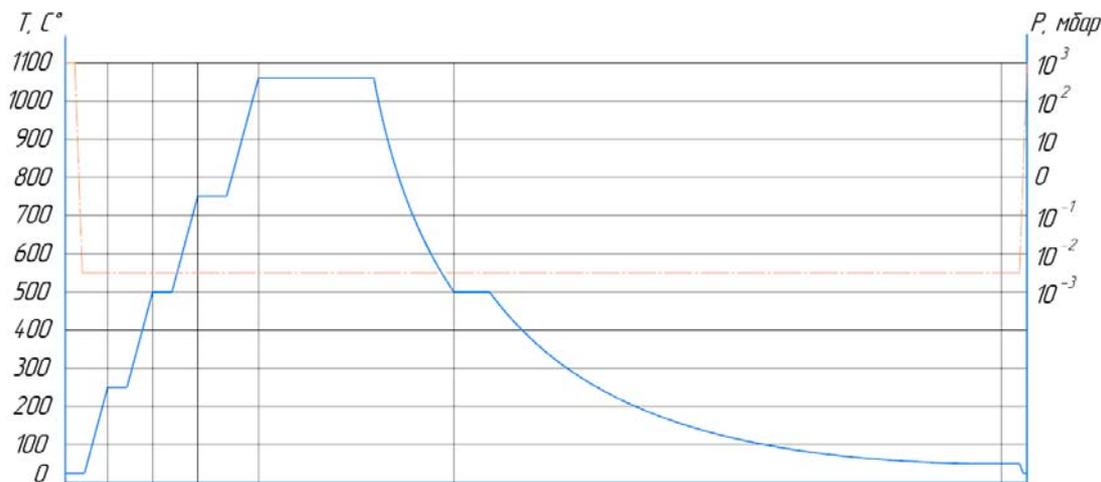


Диаграмма закалки

В заключении стоит сказать, что в результате выполненных операций структура материала и качество поверхностей камеры-демонстратора улучшились.

#### Библиографические ссылки

1. Теплухин Г. Н., Гропянов А. В. *Металловедение и термическая обработка: учеб. пособие* / СПбГТУ, 2011. 169 с.
2. Постобработка и контроль качества аддитивного производства [Электронный ресурс]. URL: <https://extxe.com/3893/postobrabotka-i-kontrol-kachestva-additivnogo-proizvodstva/> (дата обращения: 08.09.2022).
3. Курс общей химии : учебник для студентов ву-К93 / Коровин Н. В., Масленникова Г. Н., Гуськова Л. Г. и др. М. : Высш. школа, 1981, 431 с.

#### References

1. Teplukhin G. N., Gropyanov A. V. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka: ucheb. posobiye* [Metal science and heat treatment: study guide]. St. Petersburg, SPbGTU Publ., 2011, 169 p.
2. Post-processing and quality control of additive manufacturing. Available at: <https://extxe.com/3893/postobrabotka-i-kontrol-kachestva-additivnogo-proizvodstva/> (accessed 08.09.2022).
3. Kurs obshchey khimii: uchebnik dlya studentov vu-K93 [General Chemistry Course: Textbook for students vu-K93] / Korovin N. V., Maslennikova G. N., Guskova L.G. et al., M. : Higher school, 1981, 431 p.

© Фесенко И. А., Дергач И. В., Бривкальн П. А., Казаков Р. А., Назаров В. П., 2022

УДК 629.7.01:001.4

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ КАМЕРЫ-ДЕМОНСТРАТОРА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ НА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

И. А. Фесенко, И. В. Дергач, Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, 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: irino4ka1710@mail.ru

*В работе рассмотрен технологический процесс испытаний на прочность и герметичность камеры-демонстратора, изготовленной методом 3D-печати из модельного материала.*

*Ключевые слова: испытание на прочность и герметичность, приспособление для испытаний, аддитивные технологии.*

## DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL PROCESS FOR TESTING THE DEMONSTRATION CHAMBER OF A SMALL THRUST ENGINE FOR STRENGTH AND TIGHTNESS

I. A. Fesenko, I. V. Dergach, E. E. Zhigurova, K. E. Mumber, V. P. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: irino4ka1710@mail.ru

*The paper considers the technological process of testing the strength and tightness of a demonstrator chamber made by 3D printing from a model material.*

*Keywords: strength and tightness test, test fixture, additive technologies.*

Применение аддитивных технологий (АТ) позволяет получать более сложные профили поверхностей и снизить расход ресурсов и трудозатрат, чем традиционные. В ракетно-космической отрасли технологии АТ еще находятся на стадии экспериментальной отработки и идут научные исследования возможности их применения [1-2].

С использованием технологии селективного аддитивного лазерного сплавления металлического порошка на 3D-принтере (SLM-печать) была изготовлена камера-демонстратор (корпус камеры) ракетного двигателя малой тяги (РДМТ). Для подтверждения ее надежности необходимо провести комплекс испытаний и анализов. Испытания на прочность и герметичность с использованием специального приспособления являются завершающим этапом этого комплекса [3].

Согласно рабочим параметрам РДМТ и технологическим требованиям к приспособлениям для испытаний – они должны обеспечить герметичность, моделировать, и выдерживать нагрузки, которые испытывает изделие в режиме реальной работы [4], было спроектировано специальное приспособление. Его изготовило предприятие ООО «Вариант-999». Приспособление для испытаний представлено на (см. рисунок). Согласно ОСТ 92-4291-75 были выбраны испытания на прочность методом опрессовки (с использованием дистиллированной воды), на герметичность методом «Аквариума» [5] (с использованием воздуха). Испытание на герметичность производится сразу после испытания на прочность с использованием того же специального приспособления. Были разработаны режимы испытаний. Режимы представлены в таблице.

### Параметры режимов испытаний

Параметр	Прочность	Герметичность
Давление опрессовки, кг/см <sup>2</sup>	11,2	12,65
Время опрессовки, мин.	5	5
Давление испытания, кг/см <sup>2</sup>	12,75	11,5
Время испытания, мин.	5	3



Приспособления для испытаний

В заключение следует отметить, что разработка технологического процесса испытаний изделия, изготовленного методом аддитивных технологий, завершена и осталось только их провести.

### Библиографические ссылки

1. Особенности методики виброиспытаний камеры-демонстратора ЖРД малой тяги, изготовленной с использованием аддитивных технологий / Дергач И. В., Фесенко И. А., Фоменко А. А., Шестов Н. С., Манохина Э. С. // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практик: материалы IV Всероссийской науч.-практ. конф.; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск 2022. С.95-100.
2. Контроль качества камеры ракетного двигателя малой тяги, изготовленной методом 3d-печати на лазерном принтере / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков, И. А. Фесенко, А. А. Фоменко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VIII Междун. науч.-практ. конф.; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск 2022.
3. Методика технологических испытаний камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного по технологии slm-печати / Фесенко И. А., Дергач И. В., Жигурова Е. Е., Гордеев В. В., Шестов Н. С. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VIII Междун. науч.-практ. конф.; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск 2022.
4. Самошкина П. Ю. Совершенствование методики проектирования приспособлений для испытаний деталей и узлов ракетных двигателей на прочность и герметичность // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч. конф. (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 193–195.
5. ОСТ 92-4291-75 Методы гидравлических и пневматических испытаний изделий на прочность и герметичность, 1975.

### References

1. Dergach I. V., Fesenko I. A., Fomenko A. A., Shestov N. S., Manokhina E. S. [Features of the vibration testing technique of the low-thrust liquid Propellant Demonstrator Chamber Manufactured using additive technologies]. Testing, diagnostics, reliability. Theory and practice: materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference; Sibgau named after M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2022, p 95-100.
2. Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A., Fesenko I. A., Fomenko A. A. [quality control of a low-thrust rocket engine chamber made by 3d-printing on a laser printer]. Actual problems of aviation and cosmonautics: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference; Sibgau named after M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2022.
3. Fesenko I. A., Dergach I. V., Zhigurova E. E., Gordeev V. V., Shestov N. S. [The methodology of technological tests of the low-thrust rocket engine demonstrator chamber manufactured using slm printing technology]. Actual problems of aviation and cosmonautics: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference; Sibgau named after M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2022.
4. Samoshkina P. Y. [Improving a technique to design devices for tests of details and knots of rocket engines for durability and tightness]. Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016, p. 193–195. (In Russ.).
5. OST 92-4291-75 Methods of hydraulic and pneumatic testing of products for strength and tightness, 1975.

УДК 621.454.2:004.9

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

А. А. Фоменко, В. В. Гордеев, П. А. Бривкальн, Н. С. Шестов, Э. С. Манохина

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

*В данной работе рассматривается изготовление камеры ракетного двигателя малой тяги методом селективного лазерного сплавления. Представлены результаты изготовления.*

*Ключевые слова: 3D-печать, камера сгорания, SLM, инконель 718.*

## MANUFACTURING OF A ROCKET ENGINE CHAMBER BY THE METHOD OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

A. A. Fomenko, V. V. Gordeev, P. A. Brivkaln , N. S. Shestov, E. S. Manokhina

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

*In this paper, we consider the manufacture of a small thrust rocket engine chamber by selective laser fusion. The results of manufacture are presented.*

*Keywords: 3D printing, combustion chamber, SLM, inconel 718.*

Аддитивные технологии в настоящее время являются одними из быстроразвивающихся и наиболее перспективными производственными процессами в ракетно-космическом машиностроении. 3D-печать даёт возможность изготавливать изделия более сложной формы, при этом значительно снижая их себестоимость. Также преимуществом по сравнению с традиционными технологиями в ракетно-космической промышленности это снижение длительности производственного цикла изделий, сокращении и упрощении технологических операций.

Разработка нового вида изделия в ракетно-космической отрасли требует проведения большого объема научно-исследовательских, опытно-конструкторских, экспериментальных работ, а также обязательную сертификацию на государственном уровне.

Под аддитивными технологиями принимается процесс изготовления изделий на основе компьютерных 3D-моделей. Построение образца/детали происходит послойно, поэтому для него часто используют термин «наращивание» [1].

Выборочное лазерное сплавление (SLM) – технология изготовления металлических изделий сложных пространственных форм при помощи плавления порошковых составов лазером. Она позволяет производить как отдельные элементы, которые в последующем станут частью узлов и агрегатов, так и цельные (неразборные) конструкции [2].

Предварительным этапом было изготовление образцов для испытаний, опытных образцов для ознакомления с оборудованием и подбор режимов из металлического порошка алюминий-кремниевый сплав силумин РС-300, где указано в работе [3].

Для реализации плана научно-исследовательских работ был использован порошок ПР-08ХН53МБТЮ (аналог Инконель 718) (рис. 1) с фракцией 20-45 мкм, были изготовлены несколько образцов для определения режимов печати.

В соответствии с программой приоритетных научно-исследовательских работ СибГУ кафедрой ДЛА совместно с индустриальным партнером ООО «Полихром» было изготовлено несколько опытных образцов из порошкового металла ПР-08ХН53МБТЮ.

Изготовление камеры осуществлялось методом SLM-печати из металлического порошка хромоникелевого сплава ПР-08ХН53МБТЮ на 3D-принтере «Astra SLM 420» собственной разработки ООО «Полихром» (рис. 2).

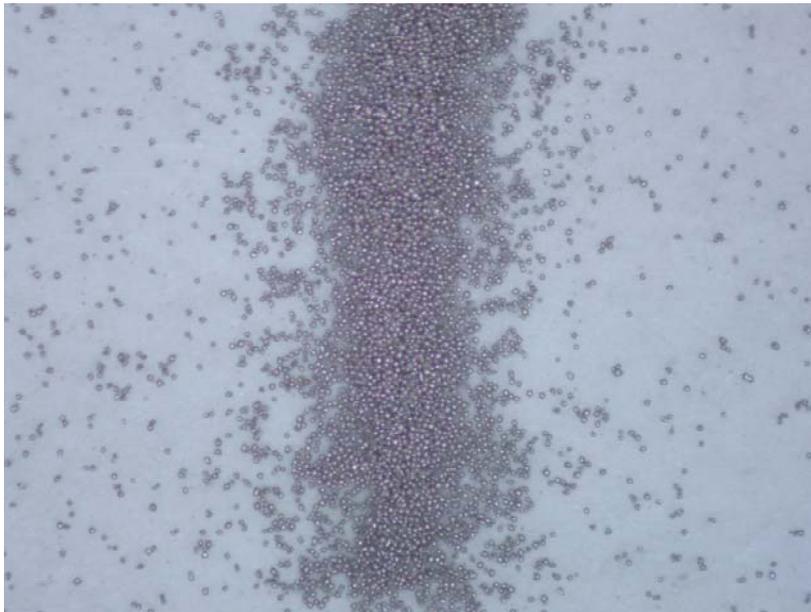


Рис. 1. Гранулы металлического порошка ПР-08ХН53МБТЮ под микроскопом при увеличении 150X

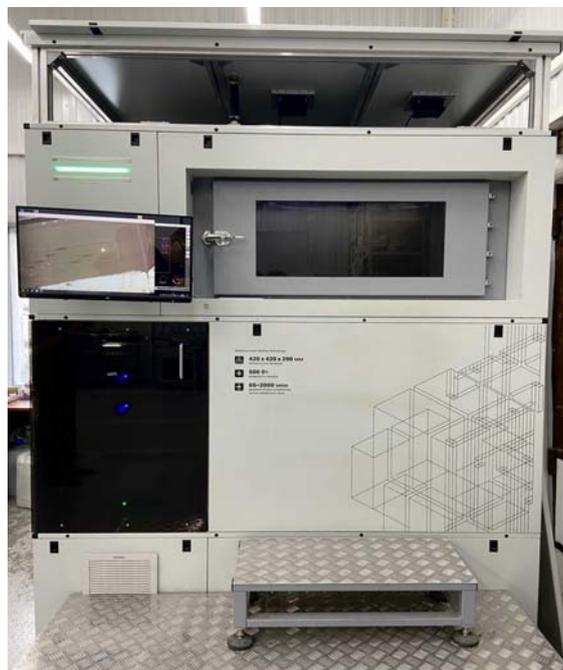


Рис. 2. 3D-принтер «Астра SLM 420»

Печать корпуса камеры-демонстратора заняла 48 часа 10 минут. По завершению печати была проведена термическая обработка – высокотемпературный отжиг при температуре 1060 °С с выдержкой 1 часа. Поверхности камеры-демонстратора были обработаны на пескоструйной установке.

С целью повышения точности изготовления изделий методом аддитивных технологий и уменьшения шероховатости поверхностей деталей проводилась электро-химическая полировка



Рис. 3. Камеры ракетного двигателя, изготовленные на 3Д-принтере

Последующими этапами будет печать камер на других режимах, отличающихся от первых двух (рис. 3), также планируется испытание камер на герметичность и прочность.

#### Библиографические ссылки

1. SLM технология – метод селективного лазерного плавления [Электронный ресурс] URL: <https://ils-mark.ru/technologies/additivnyye-tekhnologii/slm/> (Дата обращения 3.09.2022)
2. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учебное пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Филимонов; под общей редакцией А. Л. Галиновского. Москва: Издательство Юрайт, 2020. 115с.
3. Казаков Р. А., Фоменко А. А., Гордеев В. В., Бривкальн П. А., Дергач И. В. Разработка технологического процесса изготовления экспериментальной камеры ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления на 3D-принтере / Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VIII Междун. науч.-практ. конф.; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск 2022.

#### References

1. SLM technology – selective laser melting method [Electronic resource] URL: <https://ils-mark.ru/technologies/additivnyye-technologii/slm/> (Accessed 3.09.2022)
2. Additive technologies in the production of aerospace products: a textbook for universities / A. L. Galinovsky, E. S. Filimonov; under the general editorship of A. L. Galinovsky. Moscow: Yurayt Publishing House, 2020. 115p.
3. Kazakov R. A., Fomenko A. A., Gordeev V. V., Brivkain P. A., Dergach I. V. Development of a technological process for manufacturing an experimental chamber of a rocket engine using a selective laser fusion method on a 3D printer / Actual problems aviation and astronautics: materials of the VIII Intern. scientific-practical. conf.; Siberian State University M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk 2022.

© Фоменко А. А., Гордеев В. В., Бривкальн П. А., Шестов Н. С., Манохина Э. С., 2022

УДК 629.7.036

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВЫХОДНОЙ ОБЛАСТИ ОСЕВОЙ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ТУРБИНЫ НА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

А. А. Харитонова, А. И. Щербань, В. М. Зубанов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
E-mail: annakharitonova15@gmail.com

*Работа посвящена исследованию влияния изменения конфигурации выходной области малоразмерной турбины на ее характеристики.*

*Ключевые слова: турбина, осевая малоразмерная турбина, CFD-моделирование, выходная область, характеристики.*

## **THE INFLUENCE OF THE OUTPUT GEOMETRY CONFIGURATION OF A LOW-SIZED AXIAL TURBINE ON ITS PERFORMANCE**

A. A. Kharitonova, A. I. Shcherban, V. M. Zubanov

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: annakharitonova15@gmail.com

*The work is devoted to the influence of changing the configuration of the output area of a low-sized turbine on this turbine's characteristics.*

*Keywords: turbine, axial low-size turbine, CFD modeling, output domain, performance.*

Осевые малоразмерные турбины (ОМТ) обширно используются в современной технике. Преимущество их использования заключается в том, что ОМТ характеризуются малыми объемными расходами рабочего тела в сочетании с высокими перепадами энтальпий, большим сроком службы, низким уровнем шума и вибрации, небольшими габаритами и весом в сочетании с простой конструкции, технологичностью и малой стоимостью. Однако, рабочий процесс в ОМТ имеет ряд особенностей. При уменьшении габаритов ОМТ не сохраняется геометрическое подобие турбинам с аэродинамически длинными лопатками. Специфичность вторичных течений в межлопаточном канале ОМТ приводит к практически полному вырождению потенциального ядра потока, поэтому определение суммарных потерь по составляющим невозможно, так же как и применение экспериментальных зависимостей полноразмерных турбин. В то же время существует большой потенциал улучшения рабочего процесса в ОМТ за счёт доводки и оптимизации геометрии турбин. Однако большинство исследований в области рабочего процесса турбин посвящено турбинам ГТД, и не было найдено рекомендаций настроек численной модели ОМТ с характерным параметром относительной высоты лопатки 0,005–0,5 [1-3].

Перед непосредственным выполнением исследования настроек численной модели на расчётные характеристики турбины вначале необходимо определиться с конфигурацией модели ОМТ, в том числе выходной областью. В связи с этим была сформулирована цель данной работы: оценка влияния конфигурации выходной области ОМТ на расчётные характеристики малоразмерной турбины.

Объектом исследования является рабочий процесс в лопатках соплового аппарата (СА) осевой малоразмерной турбины. Предметом исследования является СА ОМТ с относительной высотой лопатки 0,027, для которого имеются экспериментальные данные, полученные на кафедре теории двигателей летательных аппаратов имени В. П. Лукачева Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева.

Для оценки влияния конфигурации выходной области ОМТ было создано четыре модели. Первая и вторая модели отличались между собой размерами перекрыш (рис. 1), но обе не учитывали наличие притраковых областей. Третья и четвертая модели отличались от первой и второй моделей учётом притраковых полостей соответственно. На рис. 2 показана расчётная область первой модели и расчётная область четвертой модели с притраковыми областями вблизи выходной кромки СА. Под перекрышей понимается разность радиусов периферии/втулки СА и периферии/втулки колеса-ловушки соответственно.

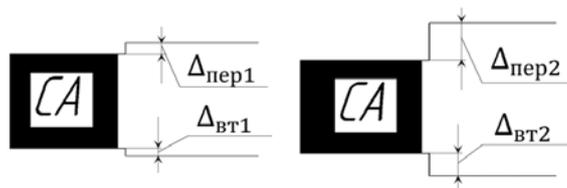


Рис. 1. Геометрия перекрыш первой и второй модели

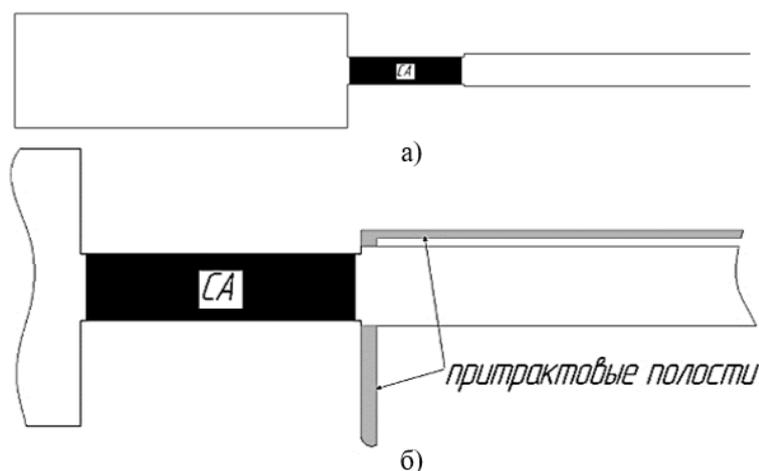


Рис. 2. Геометрия проточной части СА ОМТ:  
а – первой модели; б – четвертой модели с притраковыми областями вблизи выходной кромки СА

Геометрия проточной части была построена в ПО Siemens NX 8.5 на основе рабочих чертежей стендовой установки. Структурированная гексагональная сетка была построена в ПО Numesa AutoGrid5 [4].

Сетки первой и второй моделей содержали по 3,2 млн элементов, сетки третьей и четвертой моделей содержали по 6,6 млн. элементов. CFD-расчёт характеристик СА ОМТ был выполнен с использованием ПО NUMECA FINE/Turbo в трёхмерной постановке. В качестве рабочего тела в соответствии с экспериментом был задан воздух (реальный газ) [5].

Модель турбулентности была задана Spalart-Allmaras. Расчёты выполнены в стационарной постановке. Обработка полученных результатов моделирования было выполнено согласно методике обработки результатов в эксперименте. В результате получены расчётные зависимости коэффициента скорости СА ОМТ от изоэнтропического числа Маха в сечении на выходе из СА (рис. 2).

Из рис. 3 видно, что расчётные зависимости коэффициента скорости СА ОМТ от изоэнтропического числа Маха в сечении на выходе из СА повторяют экспериментальное распределение. При этом выявлена необходимость учёта конфигурации выходной области, так как ее изменение влияет на расположение вихрей на выходе из СА.

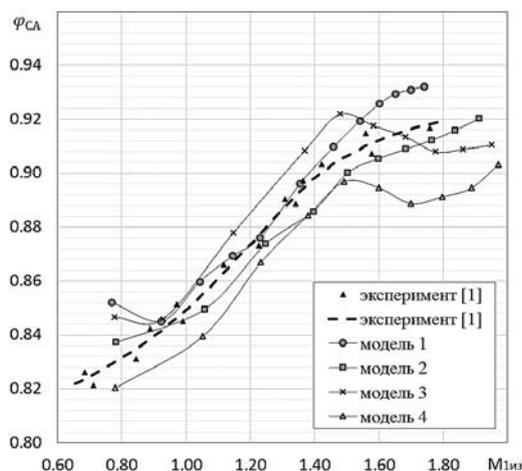


Рис. 3. Результаты моделирования рабочего процесса СА

Большее влияние притрактовых областей на коэффициент скорости СА наблюдается при  $M < 1,0$  и  $M > 1,5$ . Дальнейшее направление работы связано с исследованием влияния колеса-ловушки на распределение характеристик при использовании третьей и четвертой моделей СА ОМТ.

### Библиографические ссылки

1. Мусаткин, Н.Ф. Экспериментальный выбор оптимального профиля соплового аппарата и рабочего колеса воздушной осевой микротурбины [Текст] / Н.Ф. Мусаткин, Н.Т. Тихонов // Реф.ж. Репорт.-ВИМИ. М. 1976. №24.- 16 с.
2. Холщевников К.В., Теория и расчёт авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холщевников. – М: Машиностроение, 1970. – 610 с.
3. Иноземцев А. А., Газотурбинные двигатели [Текст] / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь, ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1201 с.
4. NUMECA Theoretical manual FINETM/Turbo v9.0. Brussels: NUMECA International, 2013. 151 p.
5. Дорофеев В. М., Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 144 с.

### References

1. Musatkin N. F. Eksperimental'nyj vybor optimal'nogo profilya soplovogo apparata i rabocheho kola vozduшной osevoj mikroturbiny [Experimental selection of optimum profile of the nozzle apparatus and impeller of an axial air microturbine]. Moscow, 1976, 16p.
2. Holshchevnikov K. V. *Teoriya i raschyot aviacionnyh lopatochnyh mashin* [Theory and Calculation of Aircraft Blade Machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1970, 610 p.
3. Inozemcev A. A. *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm, Aviadvigatel, 2006, 1201 p.
4. NUMECA Theoretical manual FINETM. *Turbo v9.0*. Brussels: NUMECA International, 2013, 151 p.
5. Dorofeev V. M. *Termogazodinamicheskij raschet gazoturbinnnyh silovyh ustanovok* [Thermogasodynamic calculation of gas turbine power plants]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 144 p.

©Харитонов А. А., Щербань А. И., Зубанов В. М., 2022

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

## ПРИМЕНЕНИЕ БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

В. В. Черненко\*, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: 2887722@mail.ru

*Балансовые испытания предназначены для оптимизации процесса проектирования высокоэффективных турбонасосных агрегатов ракетно-космической техники, представляющие собой сложный итеративный процесс, состоящий из ряда последовательных этапов.*

*Ключевые слова: межлопаточный канал, напор, пространственный пограничный слой, центробежный насос, баланс мощностей.*

## STUDY OF THE FLOWING PART OF A CENTRIFUGAL PUMP USING THE POWER BALANCE

V. V. Chernenko\*, D. V. Chernenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: 2887722@mail.ru

*Balance tests are designed to optimize the design process of highly efficient turbopump units of rocket and space technology, which are a complex iterative process consisting of a number of successive stages.*

*Keywords: interscapular channel, pressure, spatial boundary layer, centrifugal pump, power balance.*

Для ракетной-космической отрасли все острее возникает вопрос об использовании новейших технологий. Проектирование современных ракетных двигателей включает в себя разработку, проектирование и оптимизацию турбонасосного агрегата, который отвечает за стабильную подачу компонентов топлива в камеру ЖРД, и в состав которого входят центробежные насосы [1-2].

На сегодняшний день центробежные насосы являются одним из элементов насосного оборудования, которое чаще всего используется в составе современных ракетных и авиационных двигателей. Его использование позволяет предварительно увеличить давление топлива перед вводом его в топливную систему (насос подкачивающего типа), а также подать топливо внутрь камеры сгорания [3].

Проблеме энергосбережения в настоящее время уделяется повышенное внимание, при этом немаловажным пунктом является вопрос повышения КПД насосного оборудования. Энергопотребление и высокий экологический класс являются показателями качества насоса [4].

В настоящее время модельно-ориентированный подход к разработке и расчету является неотъемлемой технологией для проектирования с учетом сжатых сроков и объема предъявляемых требований. Существующие теоретические подходы к решению этих задач практически всегда являются полумпирическими. При этом одной из основных проблем является переход от моделирования элементарных актов переноса к описанию процессов на промышленном контактном устройстве с учетом масштабного перехода. Решение задачи о расчете пространственного пограничного слоя в рабочем колесе в упрощенной постановке не всегда давало удовлетворяющие практику результаты. От решения этой задачи зависят сроки, затраты при проектировании промышленных аппаратов и эффективность их работы.

Несмотря на большой объем проведенных научно-исследовательских работ, разработка методики проектирования малорасходных центробежных насосов с высокими энергетическими и эксплуатационными параметрами для космических аппаратов остается актуальной задачей.

Для того, чтобы повысить энергетические характеристики центробежного лопаточного нагнетателя, необходимо правильно определять распределения энергии в межлопаточном канале рабочего колеса [5].

Баланс мощностей – специальный баланс, который посредством системы показателей характеризует выражение закона сохранения энергии. Способ балансовых испытаний центробежного насоса включает измерение мощности суммарных и механических потерь рабочего колеса и последующее выделение мощности гидравлических потерь из общей суммы с механическими. Мощность механических потерь колеса измеряют одновременно с мощностью суммарных потерь на рабочем режиме насоса путем измерения крутящего момента на диске, имитирующем внутреннюю торцевую поверхность насоса. За счет увеличения точности и достоверности результатов испытаний метод позволяет более полно выявить недостатки насоса и на основании анализа этих недостатков разработать меры по усовершенствованию насоса. В частности, балансовые испытания, определяющие величины разных видов потерь энергии в насосе на различных режимах его работы, могут быть использованы как при разработке новых агрегатов, так и при испытании уже существующих. Баланс мощностей является единственным методом, определяющим отдельные составляющие потерь методом исследования потерь. Остальные методы – интегральные. В связи с тем, что суммарная потеря мощности в колесе, в том числе механических потерь колеса при трении жидкости на торцевую поверхность корпуса, и гидравлические потери (потери на трение жидкости в каналах колеса) диссипируется в тепловую энергию, величина ее определяется известным выражением [3,6].

Для экспериментальной оценки определения суммарных потерь в режиме максимального КПД проводят специальные расчеты балансовых испытаний и составление баланса мощности насоса.

Составляющие мощности и КПД в насосе: мощность насоса; мощность, расходуемая на потери в подшипниках и сальниках; мощность, расходуемая на дисковые потери (часто восстанавливаемы); мощность, затрачиваемая на обратные токи в колесе; полезная мощность.

Таким образом баланс эффективной мощности насоса будет определяться выражением:

$$N_{пол} = N_{затр} - (N_{зм} + N_{г} + N_{ут} + N_{мех}^{см} + N_{мех}^{кол}),$$

где  $N_{пол}$  – полезная мощность насоса;  $N_{затр}$  – затраченная мощность;  $N_{зм}$  – мощность, расходуемая гидравлические трения;  $N_{г}$  – гидравлические потери в проточной части насоса;  $N_{ут}$  – мощность, на потери с утечками рабочей жидкости;  $N_{мех}^{см}$  – потери в местах контакта со статорными частями – опоры, уплотнения; – мощность, механических потерь;  $N_{мех}^{кол}$  – мощность, расходуемая гидравлические трения.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы: необходимость проведения гидравлических испытаний и построение баланса мощностей является неотъемлемой частью конструкторского исследования. В результате балансовых испытаний будут построены кривые зависимостей гидравлического, объемного, механического видов кпд, а также линии теоретического напора от расхода жидкости по колесу. Мощность, снимаемая с двигателя, лишь частично преобразуется в полезный эффект, а остальное рассеивается в виде потерь. Мощность, получаемая насосом от двигателя, расходуется на гидравлические, объемные и механические потери, и только часть этой общей энергии эффективно используется на транспортирование жидкости.

Результаты данного исследования используются для оптимизации числа лопаток в рабочем колесе насоса.

### Библиографические ссылки

1. Насосы и компрессоры / В. И. Елин, К. Н. Солдатов, С. М. Соколовский, // Москва, Изд-во: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960. 373 с.
2. Флоринский М. М., Рычагов В. В., Насосы и насосные станции. 3-е изд. М. издательство «Колос», 1967, 387с.
3. Черненко Д. В. Гидродинамика центробежных лопаточных нагнетателей энергосиловых установок летательных аппаратов: дисс... канд. техн. наук. Красноярск, 2005. 167 с.

4. Chernenko V. V. and Chernenko D. V. Flow model in the impeller of a centrifugal pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MIP-III 2021) 29–30 April 2021, Krasnoyarsk, Russia) 2021. 1155 012065 doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012065

5. Обоснование возможностей повышения энергетических характеристик центробежных насосов / Л. А. Савин, С. В. Григорьев, Р. М. Шахбанов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-2. С. 122-127.

6. Пат. 2217724 Российская Федерация, МПК G01M15/00 F04D29/00, Способ балансовых испытаний центробежного колеса / Краев М.В., Кишкин А.А., Мелкозёров М.Г., Черненко Д.В., Жуйков Д.А. № 2001104120/06. заявл. 12.02.2001, опубл. 27.11.2003., Бюл. № 4. 5 с.

### References

1. Pumps and compressors / V. I. Elin, K. N. Soldatov, S. M. Sokolovsky, // Moscow, Publishing House: State Scientific and Technical Publishing House of Petroleum and Mining and Fuel Literature, 1960. 373 p.

2. Florinsky M. M., Rychagov V. V., Pumps and pumping stations. 3rd ed. M. publishing house "Kolos", 1967, 387s.

3. Chernenko D. V. Hydrodynamics of centrifugal bladed superchargers of power plants of aircraft: diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences Krasnoyarsk, 2005. 167 p.

4. Chernenko V. V. and Chernenko D. V. Flow model in the impeller of a centrifugal pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MIP-III 2021) 29-30 April 2021, Krasnodar, Russia) 2021. 1155 012065 doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012065

5. Substantiation of the possibilities of increasing the energy characteristics of centrifugal pumps / L. A. Savin, S. V. Grigoriev, R. M. Shakhbanov // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2015. No. 7-2. pp. 122-127.

6. Pat. 2217724 Russian Federation, IPC G01M15 / 00 F04D29 / 00, Method for balancing tests of a centrifugal wheel / Kraev M.V., Kishkin A.A., Melkozerov M.G., Chernenko D.V., Zhuikov D.A. No. 2001104120/06. dec. 02/12/2001, publ. November 27, 2003, Bull. No. 4. 5 p.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., 2022

УДК 662.76.032

## ПРОВЕРКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАБОТЫ В ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЖРДУ

М. Л. Шелудько\*, В. П. Назаров, К. О. Зенюк, Л. П. Назарова

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

*При помощи метода конечных элементов программного пакета SOLID WORKS, построена модель двухзонного газогенератора наддува топливных баков ЖРДУ. Проведено исследование по моделированию рабочего процесса в газогенераторе, построена визуализация термодинамических процессов в изделии, получены числовые характеристики. Рассмотрена методика автономных стендовых (огневых) испытаний газогенераторов наддува топливных баков, методика верификации численных методов.*

*Ключевые слова: двухзонный газогенератор, метод конечных элементов, огневые испытания, верификация расчетов.*

## CHECKING AND MODELING OF THE PARAMETERS OF THE OPERATION PROCESS IN THE GAS GENERATORS OF THE PRESSURIZATION OF THE FUEL TANKS OF THE LRE

M. L. Sheludko\*, V. P. Nazarov, K. O. Zenyuk, L. P. Nazarova

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

*Using the finite element method of the SOLID WORKS software package, a model of a two-zone gas generator for supercharging fuel tanks of the LRE was built. A study was conducted on modeling the workflow in a gas generator, visualization of thermodynamic processes in the product was built, numerical characteristics were obtained. The method of autonomous bench (firing) tests of gas generators of fuel tank boost, the method of verification of numerical methods is considered.*

*Keywords: two-zone gas generator, finite element method, fire tests, verification of calculations.*

Стабильная и бесперебойная подача жидких компонентов топлива в топливные магистрали ЖРДУ обеспечивается специальной системой наддува топливных баков летательных аппаратов (в частности, баллистических ракет и космических ракет-носителей). Величина давления наддува баков обычно определяется из условия бескавитационной работы насосов ТНА, прочности и устойчивости оболочек баков [1]. Давление компонентов топлива на входе в насосы двигателя  $P_{вх}$  складывается из давления столба жидкости  $P_{ст}$  и абсолютного давления в баке над свободной поверхностью жидкости  $P_б$ .

Учитывая потери давления  $\Delta P_{вх}$  в трубопроводах и арматуре, расположенной на магистралях от баков до насосов, получим следующее выражение:

$$P_{вх} = P_б + P_{ст} - \Delta P_{вх}.$$

Во время полета ракеты  $P_{ст}$  будет изменяться в соответствии с законом движения ракеты по заданной траектории, при этом величина  $P_{вх}$  должна поддерживаться постоянной [2].

Для вытеснения жидких компонентов из баков в газовые подушки баков подается горячий газ-вытеснитель, который во многих ЖРД создается в специальных двухкомпонентных жидкостных

газогенераторах (ЖГГ), которые называются газогенераторами наддува. Наиболее рациональным считается применение в газогенераторах наддува компонентов топлива, одинаковых с топливом в основной (тяговой) камере ЖРД.

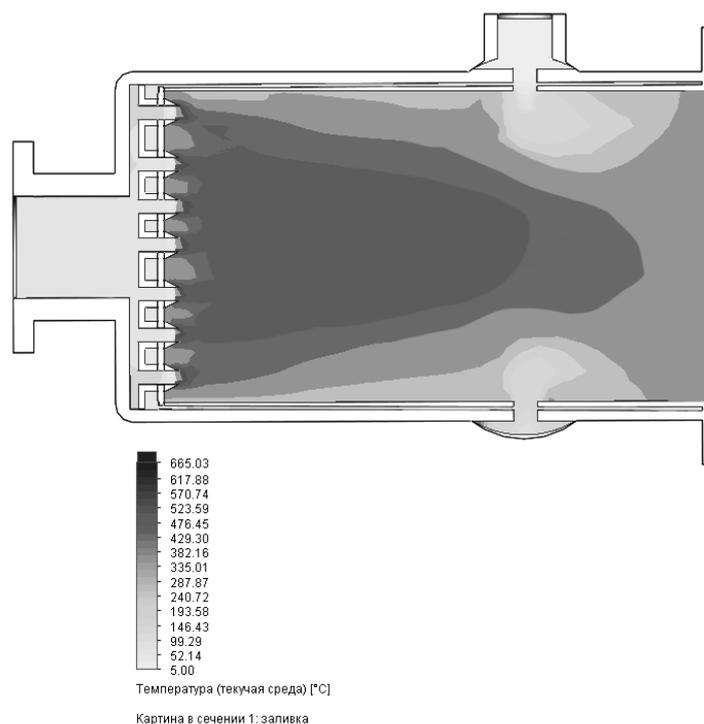
Однако эти топлива при сгорании с соотношением расходов, близких к стехиометрическому, развивают высокую температуру, недопустимую для подачи в топливные баки. Поэтому в газогенераторах наддува рабочий процесс должен быть организован таким образом, чтобы один из компонентов своим избытком балластировал топливную смесь и тем самым понижал температуру горения.

Для двухкомпонентных газогенераторов наддува топливных баков целесообразно применять самовоспламеняющиеся топлива. Однако и в этом случае организация надежного воспламенения и устойчивого горения при больших избытках одного из компонентов топлива представляет большие трудности.

Для моделирования рабочего процесса, использовалось программное обеспечение *SOLIDWORKS* с добавлением пакета “Flow Simulation”, который обеспечивает построение модели течения рабочего тела в полости модели газогенератора с учетом теплофизических характеристик. Объектом исследования является двухзонный газогенератор наддува топливных баков ЖРДУ [3].

Задание начальных параметров выбиралось исходя из определения давления в газогенераторе. А также с учетом материала и свойств рабочего тела.

В результате расчета получены не только численные значения температуры газа, но и на их основе построены градиенты распределения температуры на внутренней стенке камеры сгорания газогенератора (см. рисунок).



Градиенты распределения температур

Стенды для автономных огневых испытаний газогенераторов состоят из топливных баков, трубопроводов и запорной арматуры, обеспечивающей выполнение циклограммы изменения режимов работы. Устройство и принцип действия элементов стенда аналогичны используемым на стендах для огневых испытаний ЖРД [4-5].

Предложенная методика численного моделирования рабочего процесса методом конечных элементов в пакете Flow Simulation программного обеспечения Solid Works позволит, не прибегая к постоянным стендовым испытаниям, минуя факторы опасности и снизив затраты, получить значения исследуемых параметров. Результат позволит снизить вероятность ошибок, допущенных при проектировании и не допустить возникновения отрицательных показателей при огневых испытаниях.

### Библиографические ссылки

1. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. /Под ред. акад //ВП Глушко. М.: Изд-во «Машиностроение. 1980. 533 с.,ил.
2. Ягодников Д. А. и др. Численное исследование рабочего процесса в восстановительном газогенераторе кислород-метанового ЖРД разгонного блока //Аэрокосмический научный журнал. 2015. №. 5. С. 12-25.
3. Казанцев З. А., Ерошенко А. М., Бабкина Л. А., Лопатин А. В. Космические аппараты и технологии // Космические аппараты и технологии. Учредители: Технологическая платформа «Национальная информационная спутниковая система». 2021. Т.5. №.3. С. 121-136.
4. Стриженко П. П., Барсуков О. А. Результаты огневых испытаний окислительного газогенератора ЖРД 11Д58МФ //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). 2014. №. 5-3 (47). С. 167-175.
5. Бiryukov В. И., Назаров В. П., Царапкин Р. А. Экспериментальная и аналитическая оценка устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей //Решетневские чтения. 2017. №. 21-1. С. 197-199.

### References

1. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. *Teoriya raketnykh dvigateley* [Theory of rocket engines]. Pod red. akad VP Glushko. M.: Izd-vo «Mashinostroenie. 1980. 533 s.,il.
2. Yagodnikov D. A. i dr. [Numerical study of the working process in the reducing gas generator of the oxygen-methane liquid propellant booster unit]. *Aerokosmicheskiy nauchnyy zhurnal*. 2015. №. 5. S. 12-25 (In Russ.).
3. Kazantsev Z. A., Eroshenko A. M., Babkina L. A., Lopatin A. V. [Spacecraft and technologies]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii. Uchrediteli: Tekhnologicheskaya platforma "Natsional'naya informatsionnaya sputnikovaya sistema"*. 2021. T.5. №.3. S. 121-136 (In Russ.).
4. Strizhenko P. P., Barsukov O. A. [Results of fire tests of the oxidizing gas generator LRE 11D58MF]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika SP Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2014. №. 5-3 (47). S. 167-175 (In Russ.).
5. Biryukov V. I., Nazarov V. P., Tsarapkin R. A. [Experimental and analytical assessment of the stability of the working process in combustion chambers and gas generators of liquid rocket engines]. *Reshetnevskie chteniya*. 2017. №. 21-1. S. 197-199 (In Russ.).

© Шелудько М. Л., Назаров В. П., Зенюк К. О., Назарова Л. П., 2022

УДК 621.454.2:004.9

## К ОСОБЕННОСТЯМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н. С. Шестов, П. А. Бривкальн, А. А. Фоменко, Е. П. Талай, В. В. Гордеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: shestov\_98@bk.ru

*Рассмотрены особенности проектирования камеры ракетного двигателя малой тяги, предназначенной для изготовления методом аддитивных технологий.*

*Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, ANSYS, оптимизация, смесительная головка.*

## ON THE PECULIARITIES OF DESIGNING THE CHAMBER OF A SMALL THRUST ROCKETER ENGINE WITH THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

N. S. Shestov, P. A. Brivkaln, A. A. Fomenko, E. P. Talai, V. V. Gordeev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shestov\_98@bk.ru

*The features of designing a chamber of a low-thrust rocket engine intended for manufacturing by the method of additive technologies are considered.*

*Keywords: low-thrust rocket engine, additive technologies, ANSYS, optimization, mixing head.*

Возможности аддитивных технологий при производстве изделий ракетно-космической техники (РКТ) открывают перед конструкторами и технологами широкие перспективы. В первую очередь эти технологии применимы при производстве ракетных двигателей (РД), антенн, крупногабаритных тонкостенных конструкций (баков, герметичных отсеков, трубопроводов) и др.

Создание качественного изделия в современном мире требует использование принципиально новых принципов проектирования, основанных на точном компьютерном моделировании и методах оптимизаций на ранних стадиях проектирования [1-5].

В ходе проектирования камеры сгорания и смесительной головки жидкостного ракетного двигателя малой тяги-демонстратора для изготовления методом селективной лазерного спекания, была использована универсальная программная система анализа методом конечных элементов – ANSYS (рис. 1). С помощью ANSYS удалось оптимизировать смесительную головку до производства изделия.

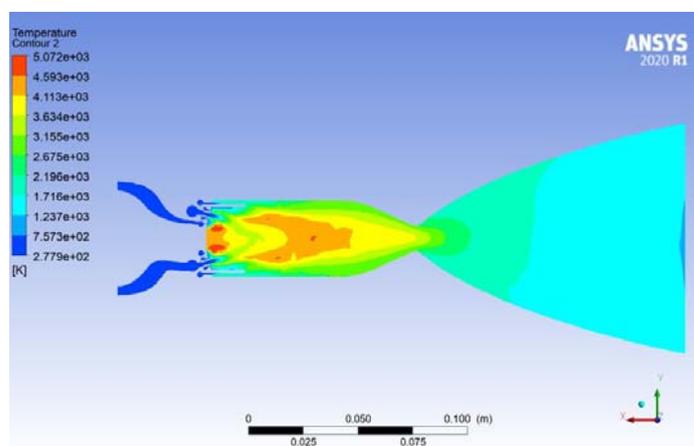


Рис. 1. Температура на входе в камеру сгорания до оптимизации

За счет оптимизации смесительной головки получилось добиться снижения обратных токов и температуры на входе в цилиндрическую часть камеры сгорания (рис. 2).

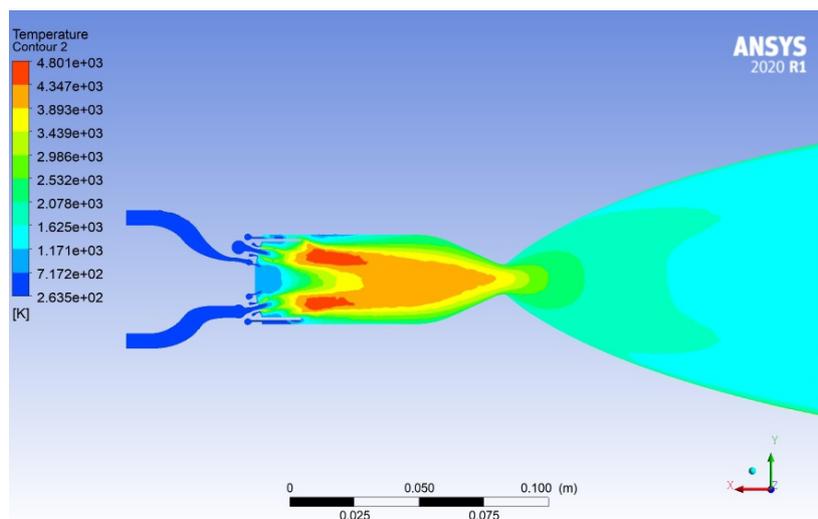


Рис. 2. Температура на входе в камеру сгорания после оптимизации

### Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
2. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники : учеб. пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев, Н. В. Коберник, А. С. Филимонов ; под общ. ред. А. Л. Галиновского. М. : Юрайт, 2020. 115 с
3. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://www.technologyreview.com/2019/06/19/134877/rocket-lab-the-small-firm-that-launched-the-3d-printed-space-revolution/> (дата обращения: 17.8.2022).
4. Толстопятов М. И. Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей. Расчет охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя : учеб. пособие / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. 88 с.
5. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учебное пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 248 с.

### References

1. Konstruktsiya i proyektirovaniye zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Construction and design of liquid-propellant rocket engines] / G. G. Gakhun, V. I. Baulin, V. A. Volodin et al. M. : Mashinostroenie Publ., 1989. 424 p.
2. Additive technologies in the production of aerospace engineering products: a textbook for universities / A. L. Galinovsky, E. S. Golubev, N. V. Kobernik, A. S. Filimonov ; under the general ed. of A. L. Galinovsky. M. : Yurayt Publishing House, 2020. 115 p.
3. Electronic textbook StatSoft. Available at: <https://www.technologyreview.com/2019/06/19/134877/rocket-lab-the-small-firm-that-launched-the-3d-printed-space-revolution/> (accessed 17.8.2022).
4. Tolstopyatov M. I. Theory and calculation of liquid-propellant rocket engines. Calculation of cooling the chamber of a liquid-propellant rocket engine: textbook. Manual / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2020. 88 p.
5. Yatsunenkov V. G., Nazarov V. P., Kolomentsev A. I. Bench tests of liquid rocket engines: a tutorial / Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2016. 248 p.

© Шестов Н. С., Бривкальн П. А., Фоменко А. А., Талай Е. П., Гордеев В. В., 2022

УДК 621.67:621.454.2

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М. А. Шикарев, Э. С. Манохина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 89134467140@bk.ru

*В работе рассматривается методика расчёта энергомассовых характеристик электронасосных агрегатов в составе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Потребность в разработке данной методики обуславливается перспективностью применения электронасосных агрегатов в составе ЖРД.*

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, электронасосные агрегаты, методика расчёта.*

## FEATURES OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ENERGY-MASS CHARACTERISTICS OF ELECTRIC PUMP UNITS OF LIQUID ROCKET ENGINES

M. A. Shikarev, E. S. Manokhina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 89134467140@bk.ru

*The paper considers a method for calculating the energy-mass characteristics of electric pump units as part of liquid rocket engines (LRE). The need to develop this technique is due to the prospects of using electric pump units as part of the LRE.*

*Keywords: liquid rocket engine, electric pump units, calculation method.*

**Введение.** Обычно для привода основных насосов и бустерных насосных агрегатов (БНА) ЖРД используются турбины различных типов. Турбина устанавливается на одном валу с насосом и приводится во вращение продуктами сгорания (ПС) ракетного топлива или при протекании компонента топлива через лопатки турбины. Электродвигатель может рассматриваться, как альтернатива турбинному приводу, так как имеет ряд преимуществ. Конструкция электронасосного агрегата (ЭНА) относительно проста, благодаря тому, что не содержит массивных и сложных в производстве элементов, например, газогенератора и турбины. Также ЭНА имеет широкие возможности регулирования режима работы двигателя. При использовании ЭНА сохраняется возможность многократного запуска двигателя, а сам алгоритм запуска упрощается [1-2].

Основной задачей рассматриваемой методики является определение предпочтительности использования электрического или классического турбинного привода насосов ЖРД применительно к двигателю с конкретными начальными параметрами. Для этого производится расчёт и сравнение суммарной массы компонентов топлива, затрачиваемых на привод турбонасосного агрегата (ТНА) ЖРД, с массой электропривода и элементов его питания в зависимости от времени работы двигателя.

Согласно рассматриваемой методике, основными исходными данными для расчёта энергомассовых характеристик ЭНА являются: тяга двигателя, удельный импульс, стехиометрическое и действительное соотношение компонентов топлива, суммарное время работы  $t$ , плотность топлива  $\rho_k$ .

При расчёте ТНА используются характеристики элементов, входящих в систему подачи топлива ЖРД: давление на входе и выходе  $p_1$  и  $p_2$ , объёмный расход  $v_k$ , КПД  $\eta_k$  – для насосов, БНА, гидротурбин; давление на входе и выходе турбины  $p_{t1}$  и  $p_{t2}$ , КПД турбины  $\eta_t$ ; термодинамические характеристики генераторного газа: коэффициент адиабаты  $k$ , газовая постоянная  $R_g$ , температура на входе в турбину  $T_0$ . При этом массой турбины пренебрегаем вследствие несопоставимости с массой топлива.

Для ЭНА характеристиками элементов, входящих в систему подачи топлива ЖРД, являются: масса аккумуляторной батареи  $M_1$ , КПД системы электропривода  $\eta_s$ , масса электродвигателя  $m_e$ , мощность электродвигателя  $N_e$ .

Далее представлены основные уравнения описываемой методики.

Для начала рассчитывается требуемый напор основных насосов для подачи компонентов топлива в камеру согласно формуле:

$$H_k = (p_2 - p_1) / \rho_k.$$

Затем определяется массовый расход компонентов через основные насосы по формуле:

$$m_k = v_k \cdot \rho_k.$$

Далее вычисляются суммарные затраты мощности для привода основных насосов:

$$N_k = (H_k - m_k) / \eta_k.$$

При сложении затрат мощности на привод насоса окислителя и горючего получаем общую мощность  $N_t$ .

Следующим шагом рассчитывается удельная плотность энергии ПС:

$$L = \frac{k}{k-1} \cdot R_g \cdot T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_{t1}}{p_{t2}} \right)^{-\left[ \frac{k-1}{k} \right]} \right].$$

Масса ПС для привода турбины ТНА определяется по формуле:

$$m_{ps} = N_t \cdot (L \cdot \eta_t).$$

Расчёт массы ПС для привода БНА аналогичен.

Расчёт массы электропривода основных насосов и элементов его питания начинается с определения ориентировочной массы электродвигателя:

$$M_e = N_t \cdot m_e / N_e.$$

КПД системы электропривода учитывает КПД всех её элементов: механической системы, электродвигателя, электрической системы и др.

Аккумуляторная батарея ЭНА состоит из отдельных элементов питания. Основная характеристика элементов питания – удельная плотность энергии (УПЭ). Применение элементов питания с высокой УПЭ является одним из способов совершенствования ЭНА.

Масса электропривода определяется согласно формуле:

$$M_{pr} = M_1 / \eta_s + M_e.$$

В результате расчётов строится график зависимости массы продуктов сгорания и массы электропривода от времени работы привода.

В работе [3] с помощью рассматриваемой методики рассчитывается электропривод основных насосов маршевого двигателя 14Д30 разгонного блока «Бриз-М». В результате расчётов было выявлено, что существенное преимущество в массе ЭНА над ТНА достигается при использовании аккумулятора с УПЭ элементов питания свыше 500 Вт·ч/кг.

В настоящий момент существуют разработки элементов питания с УПЭ 400 Вт·ч/кг, 1000 Вт·ч/кг и даже 1300 Вт·ч/кг, но эти разработки в большинстве своём не уходят дальше опытных работ. Распространёнными типами элементов питания являются литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы с УПЭ 110-240 Вт·ч/кг и 250 Вт·ч/кг соответственно [4].

На рисунке представлен график зависимости массы продуктов сгорания и массы электропривода от времени работы привода для основных насосов двигателя 14Д30. Причём УПЭ элементов питания аккумулятора ЭНА была выбрана 400 Вт·ч/кг, а время работы насосов составляет 3200 секунд [5].

Представленная в работе методика универсальна и может применяться для расчёта приводов насосных агрегатов различных типов. Прогресс в сфере разработки и производства аккумуляторов с УПЭ на уровне 400–500 Вт·ч/кг позволит существенно расширить область применения ЭНА в ракетном двигателестроении.

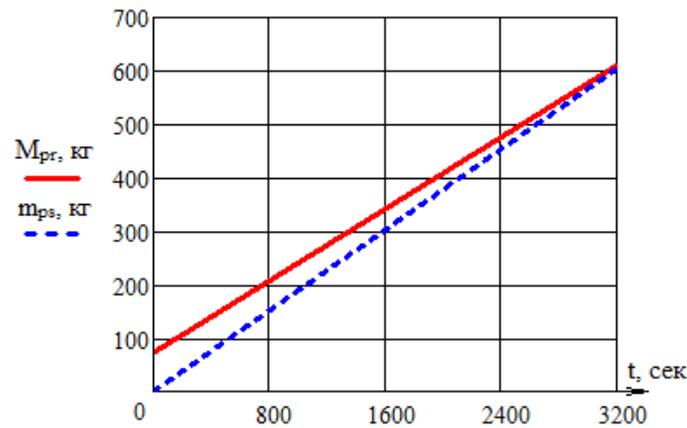


График зависимости массы ПС и массы электропривода от времени работы

### Библиографические ссылки

1. Шаров, И. Л., Зарницына Е. А. Анализ применения электронасосных систем подачи компонентов топлива ЖРД // Калашниковские чтения : материалы VI Всероссийской науч.-практ. конф. (07 ноября 2019 г. Ижевск) ; ИжГТУ. Ижевск, 2019. С. 165-169.
2. Баленков, Д. С., Соколов Д. С. Сравнительный анализ гидротурбины и электродвигателя в качестве привода бустерного насосного агрегата // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов V Международной науч.-практ. конф. / (08–12 апреля 2019 г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2019. С. 191-193.
3. Высоцкий А. А., Буц К. Е., Толстопятов М. И., Гайнутдинов А. В. Анализ перспектив использования электродвигателя в качестве привода для насосов ЖРД разгонных блоков // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. (10–14 апреля 2017, г. Красноярск) : в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 132–134.
4. Яцуненко, Г. С., Пиджакова А. Е., Жуйков Д. А. Элементы питания турбонасосных агрегатов с электроприводом / Г. С. Яцуненко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. № 14. С. 222-224.
5. Жидкостный ракетный двигатель 14Д30//ГКНПЦ им. М. В. Хруничева. URL: <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=302> (дата обращения 01.09.2022)

### References

1. Sharov I. L., Zarnitsyna E. A. [Analysis of the use of electric pump systems for the supply of fuel components of LRE]. *Kalashnikovskie chteniya : Materialy VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* / [Kalashnikov readings : Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference]. Izhevsk, 2019, P. 165-169 (In Russ.).
2. Balenkov D.S., Sokolov D.A. [Comparative analysis of hydraulic turbine and electric motor to drive the booster pump assembly]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki : materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. [Actual problems of aviation and cosmonautics : materials of the V International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2019, Vol. 1, P. 191-193 (In Russ.).
3. Vysotsky A. A., Butz K. E., Tolstopyatov M. I., Gainutdinov A. V. [Analysis of the perspectives of using the electric motor as a drive for the pumps of the leader pumps]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki : materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. [Actual problems of aviation and cosmonautics : materials of the XIII International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2017, Vol. 1, No. 13, P. 132-134 (In Russ.).
4. Yatsunenکو, G. S., Pidzhakov A. E., Zhuikov D. A. [Batteries for turbopump units with an electric drive]. *aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*. [actual problems of aviation and cosmonautics]. Krasnoyarsk, 2018, Vol. 1, No. 14, P. 222-224 (In Russ.).
5. ZHidkostnyj raketnyj dvigatel' 14D30 [Liquid rocket engine 14D30] (In Russ.). Available at: <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=302> (accessed 01.09.2022).



**Секция**

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОНСТРУКЦИЯХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

УДК 536.2.083

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЛУННОЙ БАЗЫ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А. Е. Белявский, Н. О. Боршев

Московский авиационный институт (Технический университет)  
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4  
E-mail: www.moriarty93@mail.ru

*Освоение Луны с помощью обитаемой лунной базы является в настоящее время приоритетным направлением развития космических исследований. Проектирование сложных технических систем, к которым относятся системы обеспечения теплового режима (СОТР) лунной базы, сопряжено с многими трудностями, среди которых можно выделить большое количество взаимосвязанных проектных параметров, наличие разнообразных, часто противоречивых требований к техническим характеристикам, а также высокая степень неопределенности параметров.*

*Ключевые слова: радиационный теплообменник, метеоритные частицы, тепловой режим, теория неопределенности.*

## OPTIMIZATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF THE RADIATION HEAT EXCHANGER OF THE SYSTEM FOR ENSURING THE THERMAL REGIME OF THE LUNAR BASE UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY

A. E. Belyavskii, N. O. Borshev

Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4, Volokolamsk sh., Moscow, 125993, Russian Federation  
E-mail: www.moriarty93@mail.ru

*The exploration of the Moon with the help of an inhabited lunar base is currently a priority area for the development of space research. The design of complex technical systems, which include the systems for ensuring the thermal regime of the lunar base, is fraught with many difficulties, among which one can distinguish a large number of interrelated design parameters, the presence of various, often contradictory requirements for technical characteristics, as well as a high degree of uncertainty of parameters.*

*Keywords: radiation heat exchanger, meteorite particles, thermal regime, uncertainty theory.*

**Введение.** Неопределенными параметрами на поверхности Луны являются теплофизические свойства реголита, такие как теплоемкость и плотность, коэффициенты поглощения и излучения радиационного теплообменника (РТО) [1-3] по причине запыленности поверхностей, и, как следствие, эффективная температура излучающей поверхности РТО. Также неопределенными параметрами являются коэффициенты выражения, описывающего зависимость потока микрометеоритных частиц у поверхности Луны от массы частицы. Когда статистические данные отсутствуют или их недостаточно, имеет место эпистемическая неопределенность.

Для определения проектных параметров РТО СОТР лунной базы проведена оптимизация [4-6] с неточными параметрами модели РТО методом неопределенного программирования Б. Лю. В теории неопределенности для монотонных функций и независимых переменных параметров определены аналитические выражения, которые являются детерминированными дубликатами целевых функций и ограничений.

Детерминированные дубликаты позволяют свести задачи неопределенного программирования к задачам математического программирования, что обеспечивает вычислительную эффективность.

В качестве критерия оптимизации параметров СОТР на начальных стадиях разработки выбрана минимизация приведенной массы СОТР. Требования по надежности СОТР [3] и габаритным размерам задаются ограничениями. Для оптимизации проектных параметров СОТР лунной базы выбран генетический алгоритм, являющийся представителем эволюционных методов поиска.

По результатам проведенных расчетов сделан вывод, что при увеличении диапазона изменения неопределенных параметров значения оптимальной приведенной массы РТО возрастают.

#### Библиографические ссылки

1. Флейшман Г.Д. Стохастическая теория излучения // М.: Машиностроение 2008.
2. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением // М.: Энергоатомиздат 1991.
3. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата// М.: Машиностроение 1979.
4. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе // М.: Высшая школа 1967 г.
5. Алексеев С.В., Аксенова И.В., Белокрылова В.В., Иванова Е.К., Колесникова Е.Н, Харитоновна Е.В. Новая антибликовая экранно-вакуумная теплоизоляция для космических аппаратов//Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. №4(30). С.65-69
6. Карслоу У., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. : Наука. 1964. 487 с. 7. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1988.-288с.

#### References

1. Fleishman G.D. Stochastic theory of radiation // Moscow: Mashinostroenie 2008.
2. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Heat exchange by radiation // Moscow: Energoatomizdat 1991.
3. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. Calculation of heat exchange of spacecraft// Moscow: Mashinostroenie 1979.
4. Favorsky O.N., Kadaner Ya.S. Questions of heat exchange in space // Moscow: Higher School 1967.
5. Alekseev S.V., Aksenova I.V., Belokrylova V.V., Ivanova E.K., Kolesnikova E.N., Kharitonova E.V. New anti-glare screen-vacuum thermal insulation for spacecraft//Bulletin of S.A. Lavochkin NGO. 2015. No.4(30). pp.65-69
6. Karslow U., Jaeger D. Thermal conductivity of solids. M. : Nauka. 1964. 487 p.
7. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rummyantsev S.V. Extreme methods for solving ill-posed problems.- M.: Nauka. Phys.-mat. lit., 1988.-288s.

© Белявский А. Е., Борщев Н. О., 2022

УДК 629.7

## ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. О. Борщев, А. Е. Белявский

Московский авиационный институт (Технический университет)  
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4  
E-mail: www.moriarty93@mail.ru

*В данной работе представлена методология проектирования теплозащитных материалов, применяемых в ракетно-космической промышленности. Данная методология основана на определении свойств материалов из минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальными данными полученным в ходе отработки образцов материалов.*

*Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, тепловое проектирование, метод итерационной регуляризации, коэффициент теплопроводности материала, космический аппарат.*

## INVERSE PROBLEMS IN THE DESIGN OF THE THERMAL REGIME OF THERMAL INSULATION MATERIALS

N. O. Borshchev, A. E. Belyavsky

Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4, Volokolamsk sh., Moscow, 125993, Russian Federation  
E-mail: www.moriarty93@mail.ru

*This paper presents a methodology for designing heat-shielding materials used in the rocket and space industry. This methodology is based on determining the properties of materials from minimizing the root-mean-square error between theoretical and experimental data obtained during the testing of samples of materials.*

*Keywords: inverse problem of thermal conductivity, thermal design, iterative regularization method, coefficient of thermal conductivity of material, spacecraft.*

**Введение.** При проектировании теплового режима (СОТР) космического аппарата, необходимо знать его априорные теплофизические свойства, такие как коэффициент теплопроводности, степень черноты, теплоемкость [1-3]. В последнее время с этой задачей эффективно справляются параметрические методы определения этих свойств из минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным температурным полем. В ходе решения задачи минимизации целевого функционала идет итерационное уточнение искомых параметров. Ниже предлагается методология решения задач по определению теплофизических проектных параметров при применении метода итерационной регуляризации, где в качестве регуляризирующего члена выступает номер итерации.

Таким образом можно сформулировать принцип работы данного алгоритма идентификации теплофизических параметров. Суть его заключается в следующем:

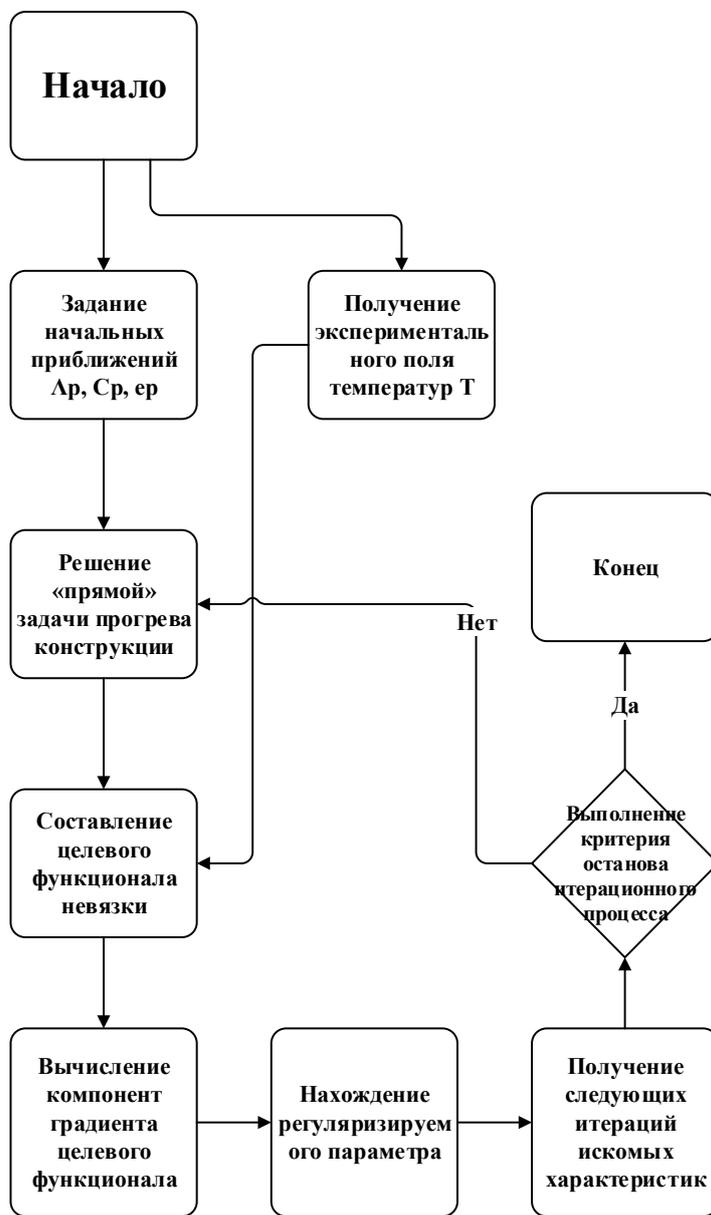
1. При заданных начальных и граничных условиях, моделирующих условия проведения эксперимента, а также при заданных базисных линейно-непрерывных или кусочно-постоянных базисных функциях решается «прямая» задача теплопроводности [4-6] с целью определения температур в некоторых определенных точках образца материала, где планируются поставить датчики температур.

2. Далее после результатов теплофизических испытаний образца составляется среднерегуляризируемая интегральная ошибка между теоретическим и экспериментальным полем температур в зонах установки датчиков температур.

3. Решается задача оптимизации данного функционала при предварительном вычислении компонент градиентов параметризованных целевых функций.

4. Ищется шаг спуска в методе «сопряженных» направлений, обеспечивающий минимум целевого функционала на следующей итерации.

5. Получаем значения целевых функций на следующей итерации. При выполнении условия останова, полученные значения каждого из блоков, домножаются на свои характерные базисные функции, считается что зависимости получены, иначе процесс 1-5 выполняется повторно. Описанный выше процесс наглядно иллюстрируется в виде блок-схемы на рисунке.



Блок-схема алгоритма идентификации исследуемых теплофизических параметров

### Библиографические ссылки

1. Флейшман Г.Д. Стохастическая теория излучения // М.: Машиностроение 2008.
2. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.. Теплообмен излучением // М.: Энергоатомиздат 1991.
- 3 Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата// М.: Машиностроение 1979.
4. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе // М.: Высшая школа 1967 г.

5. Алексеев С.В., Аксенова И.В., Белокрылова В.В., Иванова Е.К., Колесникова Е.Н, Харитоновна Е.В. Новая антибликовая экранно-вакуумная теплоизоляция для космических аппаратов//Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. №4(30). С.65-69
6. Карслоу У., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. : Наука. 1964. 487 с. 7. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1988.-288с.

#### **References**

1. Fleishman G.D. Stochastic theory of radiation // Moscow: Mashinostroenie 2008.
2. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Heat exchange by radiation // Moscow: Enegoatomizdat 1991.
3. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. Calculation of heat exchange of spacecraft// Moscow: Mashinostroenie 1979.
4. Favorsky O.N., Kadaner Ya.S. Questions of heat exchange in space // Moscow: Higher School 1967.
5. Alekseev S.V., Aksenova I.V., Belokrylova V.V., Ivanova E.K., Kolesnikova E.N., Kharitonova E.V. New anti-glare screen-vacuum thermal insulation for spacecraft//Bulletin of S.A. Lavochkin NGO. 2015. No.4(30). pp.65-69
6. Karslow U., Jaeger D. Thermal conductivity of solids. M. : Nauka. 1964. 487 p.
7. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Romyantsev S.V. Extreme methods for solving ill-posed problems.- M.: Nauka. Phys.-mat. lit., 1988.-288s.

© Борщев Н. О., Белявский А. Е., 2022

УДК 621.56

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

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 статьи рассмотрен вопрос повышения холодопроизводительности холодильной установки. Произведено сравнение работы холодильной машины с рекуперативным теплообменным аппаратом и без него. По результатам исследования сделаны выводы о применении рекуперативного теплообменного аппарата, как одного из способов повышения эффективности работы холодильной машины.*

*Ключевые слова: холодопроизводительность, эффективность, теплообменный аппарат.*

## USING A RECUPERATIVE HEAT EXCHANGER TO INCREASE COOLING CAPACITY

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 article, the issue of increasing the cooling capacity of a refrigeration unit is considered. A comparison of the operation of a refrigerating machine with a recuperative heat exchanger and without it is made. According to the results of the study, conclusions were drawn about the use of a regenerative heat exchanger as one of the ways to increase the efficiency of the refrigerating machine.*

*Keywords: cooling capacity, efficiency, heat exchanger.*

Холодильные системы на сегодняшний день являются большими потребителями электроэнергии. Сокращение эксплуатационных затрат, а также повышение холодопроизводительности холодильных систем является актуальным направлением исследования. Снизить энергопотребление холодильного оборудования, можно за счет повышения холодопроизводительности холодильных установок. Одним из способов повышения холодопроизводительности, является переохлаждение жидкого хладагента.

Переохлаждение можно получить различными способами. Одним из таких способов, является замена одноступенчатого сжатия, на многоступенчатое сжатие, когда переохлаждение происходит при кипении хладагента в промежуточном сосуде при промежуточном давлении. Использование промежуточного сосуда во многом определяет эффективность и экономичность холодильной установки в целом [1].

Также для переохлаждения используют специальные рекуперативные теплообменники типа «труба в трубе». В этих аппаратах, переохлаждение происходит за счет парообразования хладагента, выходящего из испарителя.

Процесс переохлаждения наиболее эффективен в низкотемпературных установках. В таких установках переохлаждение хладагента после конденсатора на 1 градус, позволяет повысить холодопроизводительность на 1 % [2].

При использовании теплообменников типа «труба в трубе» (как правило, для малых холодильных машин) особое внимание уделяют интенсификации теплообмена в аппарате. С этой целью либо применяют оребренные трубы, либо используют всевозможные вставки (проволочные, ленточные и т. д.) в паровой области или в паровой и жидкостной областях [3].

Использование в настоящее время в схемах холодильных установок эффективных маслоотделителей (промывных или циклонных на стороне нагнетания, гидроциклонов – в испарительной системе) также делает возможным применение дополнительных безмеевиковых промежуточных сосудов – аппаратов более эффективных и более простых в конструктивном исполнении [4].

В качестве практического примера рассмотрим параметры работы холодильной установки, которая охлаждает 5 тонн мясного полуфабриката в городе Красноярске. С помощью программы «Cool-Pack 1.50» построим диаграмму работы установки (рис. 1) [5].

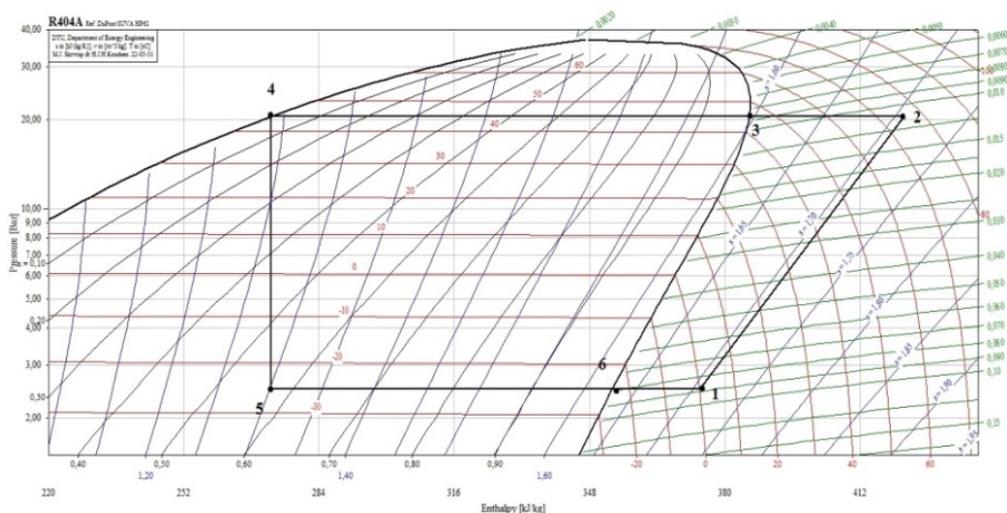


Рис. 1. Диаграмма работы установки без рекуперативного теплообменного аппарата

Удельная массовая производительность данной установки составляет 102 кДж/кг. Холодильный коэффициент  $COP = 2,10$ .

Произведем монтаж рекуперативного теплообменного аппарата в данную холодильную установку (рис. 2).

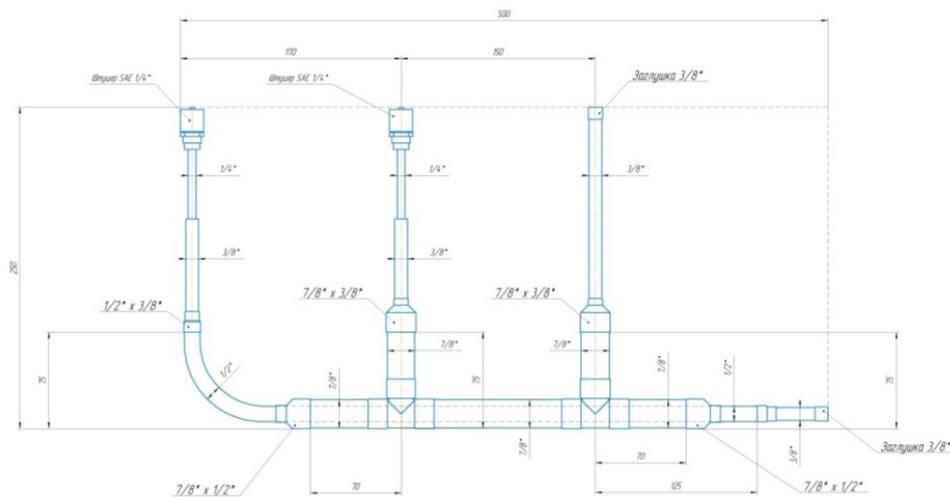


Рис. 2. Рекуперативный теплообменный аппарат типа «труба в трубе»

Определим холодопроизводительность холодильной установки, с рекуперативным теплообменником. Для этого построим диаграмму работы и вычислим величину переохлаждения после конденсатора в рекуперативном теплообменнике рабочего тела (рис. 3).

Удельная массовая производительность системы составила 113,3 кДж/кг. Холодильный коэффициент  $COP = 2,37$ .

При величине переохлаждения 6 К, получаем разницу в холодопроизводительности 11,3 кДж/кг. Это значит, что в нашей установке на 1 К приходится практически 2 кДж/кг удельной холодопроизводительности.

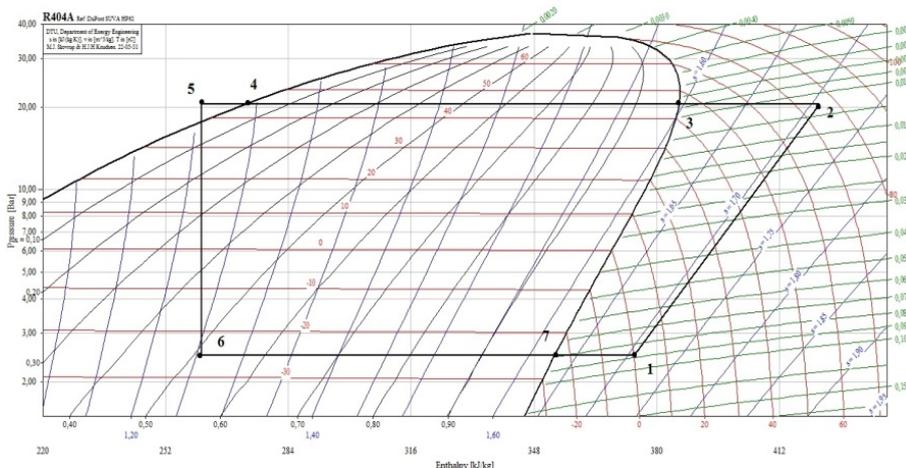


Рис. 3. Диаграмма работы установки с рекуперативным теплообменным аппаратом

Таким образом, в данной работе рассмотрен вопрос повышения холодопроизводительности за счет использования дополнительного рекуперативного теплообменного аппарата. Использование рекуперативных теплообменных аппаратов – актуальное направление в холодильной технике.

#### Библиографические ссылки

1. Повышение эффективности работы холодильной установки за счет переохлаждения хладагента [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/78/372/443.php?ysclid=l7ngrooapv212346154> (дата обращения 4.09.2022).
2. Зеликовский И. Справочник по теплообменным аппаратам малых холодильных машин. М.: Пищевая промышленность, 1978. 178 с.
3. Как померить перегрев и переохлаждение фреона [Электронный ресурс]. URL: <https://rt82.ru/for-institutions/kak-pomerit-peregrev-i-pereohlazhdenie-freona-pereohlazhdenie/h> (дата обращения 4.09.2022).
4. Ионов А. Эффективность производства холода. Калининград: Кн. изд-во, 1990. 174 с.
5. CoolPack1.50 [Электронный ресурс]. URL: <https://coolpack.software.informer.com> (дата обращения 4.09.2022).

#### References

1. Improving the efficiency of the refrigeration unit by supercooling the refrigerant. Available at: <https://pandia.ru/text/78/372/443.php?ysclid=l7ngrooapv212346154> (accessed 4.09.2022).
2. Zelikovskiy I. Handbook on heat exchangers of small refrigerating machines. M.: Food industry, 1978. 178 p.
3. How to measure overheating and hypothermia of freon. Available at: <https://rt82.ru/for-institutions/kak-pomerit-peregrev-i-pereohlazhdenie-freona-pereohlazhdenie/h> (accessed 4.09.2022).
4. Ionov A. Efficiency of cold production. Kaliningrad: Publishing house, 1990. 174 p.
5. CoolPack1.50. Available at: <https://coolpack.software.informer.com> (accessed 4.09.2022).

© Булов А. О., 2022

УДК 621.56

## ТУРБУЛИЗАЦИЯ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

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 статьи рассмотрен вопрос повышения эффективности теплообменного оборудования. Показаны основные способы интенсификации процесса теплообмена. Подробно описана специфика использования профилированных труб в теплообменном оборудовании. Сделаны выводы об эффективности использования профилированных труб в теплообменных аппаратах.*

*Ключевые слова: теплообменный аппарат, профилированные трубы, турбулизация, интенсификация.*

## TURBULIZATION AS A WAY TO INTENSIFY THE HEAT EXCHANGE PROCESS

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 article, the issue of increasing the efficiency of heat exchange equipment is considered. The main ways of intensifying the heat exchange process are shown. The specifics of the use of profiled pipes in heat exchange equipment are described in detail. Conclusions are drawn about the efficiency of using profiled pipes in heat exchangers.*

*Keywords: heat exchanger, profiled pipes, turbulence, intensification.*

На современных промышленных предприятиях химической, газовой, нефтяной, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности, а также в энергетике, авиационной и космической технике широко используются теплообменные аппараты для охлаждения, нагрева, испарения и конденсации жидкости, пара и их смесей.

Существует большое разнообразие теплообменников, которые различаются по способу передачи тепла, а также по конструктивному и функциональному признаку. С развитием энергетических мощностей и наращиванием объема производства все сильнее растет масса и габариты используемых теплообменных аппаратов. Для их производства тратится большое количество цветных и легированных металлов [1].

Поэтому оптимизация таких сложных теплоэнергетических систем позволят найти пути повышения эффективности оборудования. Также это открывает возможность поддержания работоспособного состояния теплоэнергетического оборудования в требуемых температурных диапазонах, не говоря уже о снижении капитальных затрат и энергоресурсов.

Эффективность теплообменника определяется количеством тепловой энергии, которое он передает за определенное время. Снижение габаритов и массы теплообменных аппаратов сегодня является актуальной проблемой. Одним из многообещающих путей решения данной проблемы является интенсификация теплообмена. Интенсификация процесса теплообмена в теплообменном аппарате – один из максимально эффективных способов снижения энергозатрат, который представляет большой интерес и имеет большое народнохозяйственное значение.

Существует много способов интенсификации теплообмена: повышение скорости теплоносителя, повышение разницы температур между холодным и горячим теплоносителем, при конденсации пара – снижение сопротивления пленки конденсата и повышение скорости пара (при испарении жидкости) увеличение числа центров парообразования, турбулизация потока и т. д.

При выборе метода интенсификации теплообмена необходимо учитывать универсальность метода для различных теплоносителей, загрязняемость поверхности, технологичность изготовления и сборки теплообменного аппарата и особенности эксплуатации. Все эти ограничения значительно снижают возможность выбора одного из возможных методов интенсификации [2].

В качестве практического примера далее рассмотрим использование периодически кольцевых выступов – один из наиболее эффективных способов интенсификации. Турбулизаторы создают вихревые зоны в пограничном слое, что приводит к его уменьшению. Стоит отметить, что применение кольцевых тубулизаторов 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, которая уже существует. При использовании кольцевых канавок и диафрагм происходит турбулизация потока в пристенном слое, что обеспечивает интенсификацию теплообмена (рис. 1) [3].

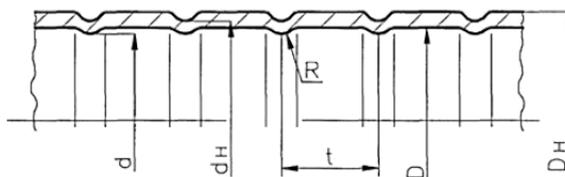


Рис. 1. Продольный разрез трубы (с канавками)

Интенсификация теплообмена с наружной стороны определяется изменением гидродинамики течения теплоносителя на профилированной поверхности трубки. Интенсификация с внутренней стороны также определяется гидродинамикой потока – нарушением упорядоченного течения жидкости в вязком подслое за счет его турбулизации и закрутки. Гидравлическое сопротивление профилированных трубок (рис. 2) при этом выше, чем у гладких трубок, что требует соответствующего увеличения мощности на прокачку теплоносителя через них [4].

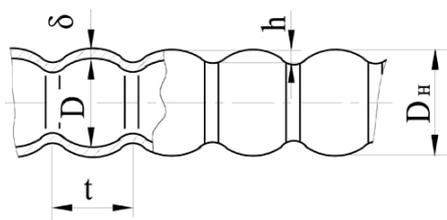


Рис. 2. Профильная кольцевая трубка

На рис. 3, в качестве примера представлены расчетные и осредненные опытные данные по эффективности применения ПВТ в подогревателях низкого давления ПТУ на номинальном и переменном режимах работы [5].

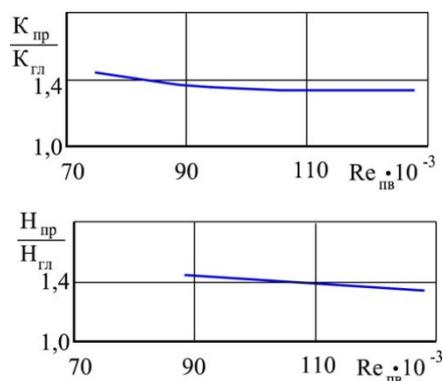


Рис. 3. Увеличение коэффициента теплопередачи аппарата с профилированными трубками по сравнению с гладкими

Использование профилированных труб в теплообменном оборудовании способствует увеличению площади контакта и турбулизации. Кроме этого, разные профили канавок в трубах будут давать разные результаты моделирования теплообмена, и главный результат это практические рекомендации в совершенствовании и изготовлении теплообменного оборудования.

#### **Библиографические ссылки**

1. Кузма-Китча, Ю. А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2001, 112 с.
2. Теплообменные аппараты и оборудование [Электронный ресурс]. URL: <https://gas-burners.ru/teploobmennoe-oborudovanie/teploobmennye-apparaty-i-oborudovanie/?ysclid=17nknzkhhz981521728> (дата обращения 4.09.2022).
3. Ибрагимов, У. Х. Интенсификация теплообмена в каналах / Молодой ученый. 2016. № 8 (112). С. 225-229.
4. Теплообмен в энергетических теплообменных аппаратах тепловых электрических станций [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=713](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=713) (дата обращения 4.09.2022).
5. 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 4.09.2022).

#### **References**

1. Kuzma-Kitscha, Yu. Methods of heat transfer intensification. Moscow: Publishing House of the MEI, 2001, 112 p.
2. Heat exchangers and equipment. Available at: <https://gas-burners.ru/teploobmennoe-oborudovanie/teploobmennye-apparaty-i-oborudovanie/?ysclid=17nknzkhhz981521728> (accessed 4.09.2022).
3. Ibragimov, U. Intensification of heat transfer in channels / Young scientist. 2016. No. 8 (112). pp. 225-229.
4. Heat exchange in energy heat exchangers of thermal power plants. 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 4.09.2022).
5. 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 4.09.2022).

© Булов А. О., 2022

УДК 536.248.2

## ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ИНЕЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКА

Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов, Д. А. Нестеров

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Экспериментально исследованы инееобразование и характеристики теплопередачи на поверхности ребер теплообменника при обтекании потоком влажного воздуха.*

*Ключевые слова: ребристый теплообменник, инееобразование, термическое сопротивление, теплопередача.*

## EFFECT OF FROST FORMATION ON CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGER

E. N. Vasil'ev, D. P. Emel'yanov, D. A. Nesterov

Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Frost formation and heat transfer characteristics on the surface of the heat exchanger fins in the case of a moist air flow are experimentally studied.*

*Keywords: finned heat exchanger, frost formation, thermal resistance, heat transfer.*

Термические сопротивления устройства подвода теплоты оказывают значительное влияние на холодильный коэффициент и холодопроизводительность термоэлектрической системы охлаждения [1; 2]. При работе холодильных установок влага, содержащаяся в воздухе морозильной камеры, оседает в виде инея на ребрах радиатора, имеющего отрицательную температуру. Образование слоя инея приводит к возникновению дополнительного термического сопротивления, снижающего общий коэффициент теплоотдачи поверхности ребер. Учет процессов образования инея необходим при выборе конструкции и геометрических параметров теплообменника устройства подвода теплоты термоэлектрической системы охлаждения.

Процесс инееобразования исследовался на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рис. 1. Стенд состоит из корпуса бытовой морозильной камеры 1, макета воздушного теплообменника 2, емкости с водой 3, вентилятора 4, радиатора системы охлаждения 5. Для интенсификации испарения в емкость с водой помещены ультразвуковой генератор и нагреватель, которые подключены к источнику питания 6. Температурный режим ребер макета и внутреннего объема стенда обеспечивается за счет циркуляции теплоносителя, поступающего из циркуляционных термостатов LOIP LT-300 7 и 8. В системе измерения температуры 9 использованы термопары, размещенные в четырех точках на ребре макета теплообменника, в емкости с водой, на входе и выходе из макета, в объеме камеры. Регистрация значений температуры производилась автоматизированным вычислительным комплексом на базе измерительной системы L-Card E-270 9 и компьютера 10.

Макет теплообменника является фрагментом воздушного радиатора термоэлектрического блока охлаждения (рис. 2). Термоэлектрические модули и термосифоны в макете не использовались, их функцию выполняли термостат и трубки, к которым припаяны ребра в виде прямоугольных пластин, имеющих поперечные размеры  $150 \times 50$  мм<sup>2</sup> и толщину 1 мм. Макет помещен в корпус из оргстекла, через входное сечение которого поступает влажный воздух от вентилятора, стрелкой показано направление потока воздуха.

Динамика процесса отслеживалась по временным температурным зависимостям (рис. 3). Эксперименты начинались с предварительного включения термостатов и нагревателя в емкости с водой для получения заданных параметров исследуемого процесса и инееобразования, момент включения отмечен на временной шкале цифрой 1.

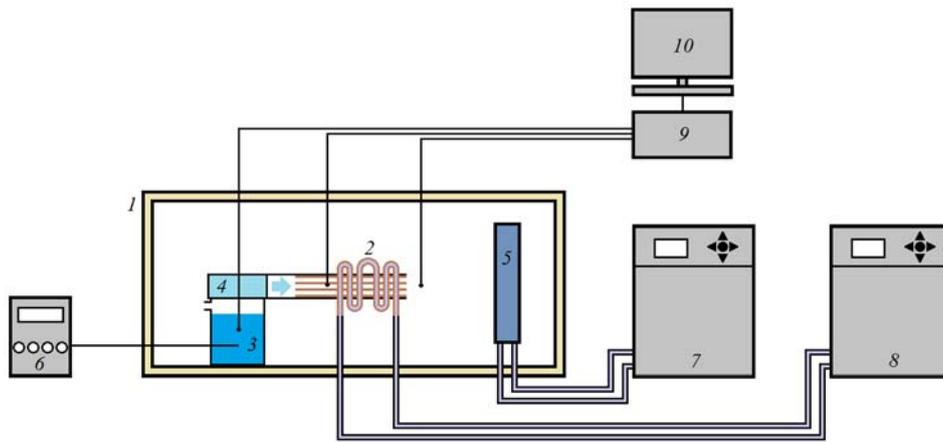


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

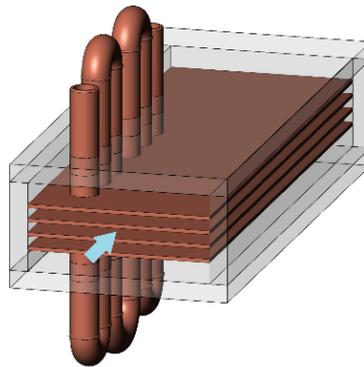


Рис. 2. Конструкция макета пластинчатого теплообменника

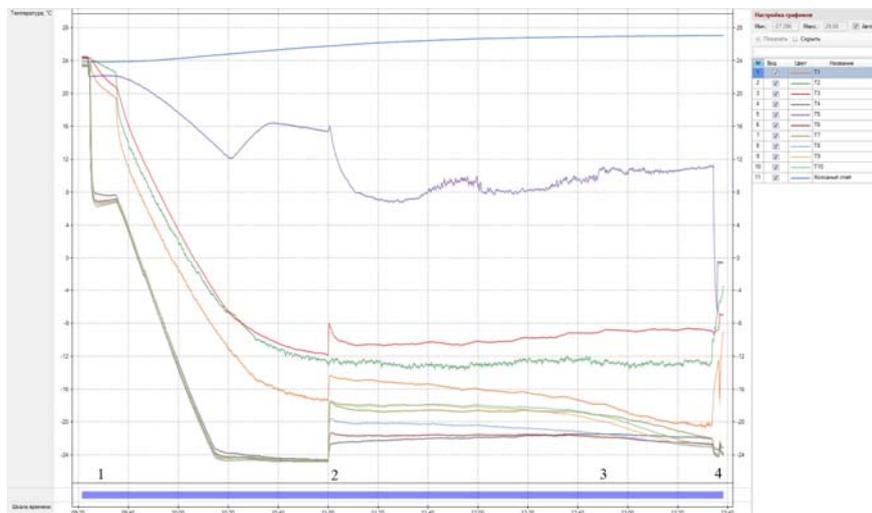


Рис. 3. Временные зависимости температуры

После выхода температурных зависимостей на установившиеся уровни производилось включение вентилятора, обеспечивающего подачу влажного воздуха через входное сечение макета (момент 2). С этого момента начиналось осаждение влаги на поверхности ребер и трубок в виде инея. Толщина слоя инея на ребрах оценивалась визуально через прозрачные стенки корпуса макета, по изменению температурных зависимостей и по скорости потока воздуха на выходе из макета. С некоторого момента времени 3 происходило заметное снижение значений температуры поверхности ребер, которое связано со уменьшением притока теплоты вследствие постепенного перекрытия поперечного сечения межреберных каналов при увеличении слоя инея. Постоянство температуры в период стабильного теплообмена во временном интервале 2–3 обеспечивается постоянством термического сопротивления слоя инея.

Эксперимент прекращался, когда канал полностью перекрывался слоем инея и продув воздуха отсутствовал (момент 4). Исследования проводились для двух ориентаций макета, различных температурных режимах термостатов и значений мощности нагревателя в емкости с водой [3]. Из экспериментов установлено, что удлинение выступающей части ребер позволяет повысить длительность временного интервала со стабильной теплопередачей за счет более однородного осаждения инея на поверхности ребра.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование инееобразования при различных параметрах процесса на макете пластинчатого теплообменника. Измерения температуры поверхности ребра показали наличие временного интервала, в течение которого сохраняются стабильные значения температуры, свидетельствующие о поддержании теплопередающей способности ребер на постоянном уровне в условиях непрерывного инееобразования.

#### Библиографические ссылки

1. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов // Вестник СибГАУ. 2013. №4(50). С.9-13.
2. Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 5. С. 743-747.
3. Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А. Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике // Журнал Сибирского фед. ун-та. Сер. «Техника и технология». 2022. Т. 15, №1. С. 24–34.

#### References

1. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A. [Analysis of thermoelectric modules efficiency in cooling systems]. Vestnik SibGAU. 2013, no. 4(50), p. 9–13. (In Russ.)
2. Vasil'ev E. N. Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system // *Technical Physics*. 2021, vol. 66, no. 5, p. 720–724.
3. Vasil'ev E. N., Emel'yanov D. P., Nesterov D. A. [Heat exchange modeling in cooling fins] // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022, vol. 15, no. 1, p. 24-34. (In Russ.).

© Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А., 2022

УДК 532.6

## ОСОБЕННОСТИ СТЕКАНИЯ ВОДЫ ИЗ НАКЛОННОГО ЩЕЛЕВОГО КАНАЛА ПРИ ТАЯНИИ ИНЕЯ

Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Представлены результаты экспериментального исследования влияния капиллярных явлений на стекание воды при таянии снега в щелевом канале.*

*Ключевые слова: щелевой канал, холодильная установка, стекание воды, капиллярная постоянная.*

## PECULIARITIES OF WATER DRAINING FROM AN INCLINED SLOT CHANNEL DURING FROST MELTING

E. N. Vasil'ev, D. P. Emel'yanov

Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*The results of an experimental study of the influence of capillary phenomena on the runoff of water during snow melting in a slotted channel are presented.*

*Keywords: slot channel, refrigeration unit, runoff of water, capillary constant.*

При работе холодильных установок влага, содержащаяся в воздухе, оседает в виде инея на поверхности ребер теплообменника, имеющих отрицательную температуру. По результатам экспериментов по инееобразованию в теплообменниках установлено, что образовавшийся между ребрами слой инея перекрывает часть межреберного промежутка и ухудшает условия теплообмена, поскольку это обуславливает снижение коэффициента теплоотдачи поверхности и сокращение эффективного поперечного сечения [1]. Для устранения этих негативных факторов образовавшийся иней удаляют из межреберных каналов, для этого производятся периодические профилактические оттаивания. Удаление воды может осуществляться как за счет естественного стекания, так и путем принудительной продувки каналов воздухом.

Процесс стекания воды из межреберных каналов обеспечивается действием силы тяжести, препятствующим фактором являются капиллярные явления, обусловленные действием сил поверхностного натяжения. Характерный размер, при котором начинают проявляться капиллярные явления, определяется капиллярной постоянной [2]

$$a_c = \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_w - \rho_a)}}$$

Здесь  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $g$  – ускорение силы тяготения,  $\rho_w$  и  $\rho_a$  – плотности воды и воздуха. Для воды при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$  капиллярная постоянная  $a_c = 3,9$  мм, формула дает оценочное значение характерного значения системы, при котором капиллярные явления становятся существенными. Для получения точных параметров, при которых начинают проявляться капиллярные явления, были проведены эксперименты в щелевом канале при различных углах наклона.

Щелевой канал образован двумя пластинами фольгированного стеклотекстолита, имеющими размер  $60 \times 210$  мм<sup>2</sup> (рис. 1). Расстояние между пластинами  $a$  определяется толщиной уплотнительных прокладок, закрепленных на краях канала.

Внутренний объем щелевого канала заполнялся снегом, его дальнейшее таяние происходило за счет конвективного теплообмена с окружающим воздухом. В ходе экспериментов менялись значения угла наклона ( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $20^\circ$ ) и расстояния между пластинами в диапазоне  $a = 2,8\text{--}5,2$  мм. В ходе экспериментов велось визуальное наблюдение, фотосъемка и проводились измерения исходной массы снега, помещенной в щелевой канал, значений масс воды, оставшихся в канале после свободного стекания.

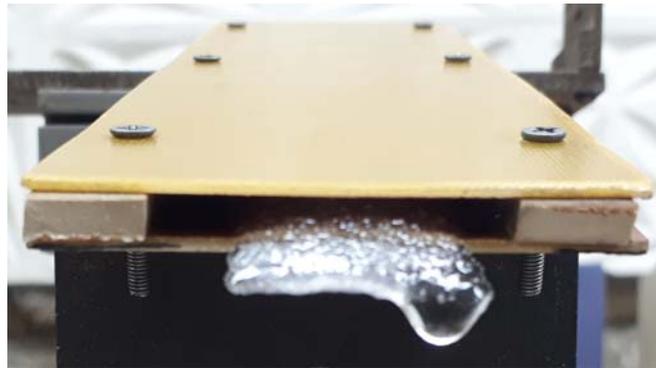


Рис. 1. Щелевой канал

Процесс стекания воды из щелевого канала зависит от соотношения капиллярных явлений и силы тяжести, которое зависит от зазора и угла наклона канала. При уменьшении зазора роль капиллярных явлений растет, что препятствует стеканию воды. Увеличение угла наклона при прочих равных условиях способствует лучшему удалению воды из канала. При исследовании процессов таяния снега и стекания воды были установлено формирование следующих характерных структур в щелевом канале: полное или частичное перекрытие поперечного сечения канала на выходе (пробка), локальная перемычка между верхней и нижней сторонами канала (рис. 2).



Рис. 2. Остаточные перемычки, оставшиеся после стекания воды

Присутствие остаточной массы воды в межреберных каналах после стекания является негативным фактором для теплообменника. При возобновлении работы холодильной установки оставшаяся вода снова замерзнет, а поперечное сечение канала или его часть будет заблокирована льдом, кроме того, замерзание воды может привести к деформации ребер теплообменника. Эти последствия замерзания воды в межреберных каналах приведут к ухудшению эксплуатационных характеристик теплообменника.

По результатам экспериментов, проведенных при разных углах наклона щелевого канала  $\alpha$ , были установлены минимальные значения зазора  $a$  между пластинами, при которых вода во всех случаях стекала без формирования перемычек и пробок на выходе. На рис. 3 данные значения отмечены красными кружками. По этим экспериментальным точкам на основе интерполяции была получена зависимость  $a(\alpha)$  являющаяся границей свободного стекания воды из канала без влияния капиллярных сил (рис. 3). Для режимов, соответствующих значениям  $a$  выше границы капиллярные силы не влияют на стекание воды, при значениях  $a$  ниже границы наблюдались режимы как с формированием пробок и перемычек, так и полного стекания воды из канала.

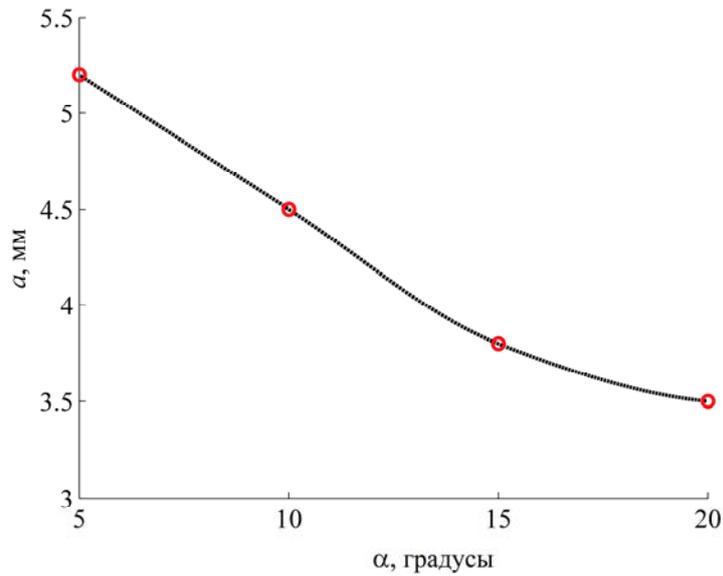


Рис. 3. Граница раздела режимов стекания воды в щелевом канале

Таким образом, установлены особенности стекания воды в щелевом канале в зависимости от зазора и угла наклона канала. Определена зависимость от угла наклона минимальной величины зазора щелевого канала, обеспечивающей свободное стекание воды без влияния капиллярных сил.

#### Библиографические ссылки

1. Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А. Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике // Журнал Сибирского фед. ун-та. Сер. "Техника и технология". 2022. Т. 15. №1. С. 24–34.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Гидродинамика. Т. 6. М.: Наука, 1986. 736 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. Landau L. D., Lifshits E. M. *Theoretical Physics: Hydrodynamics*, V. 6, Moscow, Nauka., 1986. 736 p. (In Russ.)

© Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., 2022

УДК 629.79

## ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Делков, Ф. В. Танащенко, М. Г. Мелкозеров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*В работе предложено одномерная комплексная модель теплопередачи системы терморегулирования космических аппаратов (СТР КА) включающая в себя характерные тепловые потоки с южной и северной панели космического аппарата через последовательные радиационные теплоотдачи, теплопроводность панелей, теплоемкость жидкостного контура, тепловыделения служебного модуля и модуля полезной нагрузки. Система уравнений формализована в виде четырех алгебраических уравнений, относительно усредненных температур характерных изотермических поверхностей и позволяющие вести решение по заданным параметрам.*

*Ключевые слова: комплексная теплопередача, теплопроводность, конвекция, излучение, панели космического аппарата, коэффициент теплообмена, изотермические поверхности, система уравнений теплопередач, система терморегулирования.*

## ONE-DIMENSIONAL MODEL OF COMPLEX HEAT TRANSFER IN A SPACECRAFT THERMAL CONTROL SYSTEM

A. V. Delkov, F. V. Tanasiyenko, M. G. Melkozerov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*The paper proposes a one-dimensional complex model of heat transfer of the spacecraft thermal control system, which includes characteristic heat flows from the southern and northern panels of the spacecraft through successive radiative heat transfers, thermal conductivity of the panels, heat capacity of the liquid circuit, heat release of the service module and the payload module. The system of equations is formalized in the form of four algebraic equations relative to the averaged temperatures of the characteristic isothermal surfaces and allowing the solution to be carried out according to the given parameters.*

*Keywords: complex heat transfer, heat conduction, convection, radiation, spacecraft panels, heat transfer coefficient, isothermal surfaces, system of heat transfer equations, thermal control system.*

Тепловой режим современных негерметичных КА и его элементов описывается системой уравнений комплексной теплопередачи.

Под комплексной теплопередачей понимается передача тепла одновременно более чем одним способом теплообмена (теплопроводностью, конвекцией и излучением) [1].

В основе данной системы уравнений лежит описание теплового состояния каждого элемента структурно функциональной модели КА уравнением теплового баланса, а тепловые связи (коэффициенты теплообмена) однозначно определяют характер и интенсивность теплообмена каждого элемента, как с окружающей средой, так и с остальными элементами [2].

Выделим на расчетной схеме изотермические плоскости совпадающие с граничными поверхностями  $T_1, T_2, T_3, T_4$  (см. рисунок).

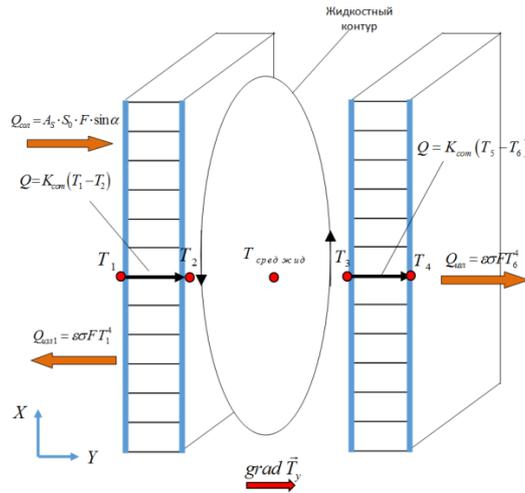
Рассмотрим тепловой баланс каждой поверхности.

Тепловой солнечный поток  $Q_{\text{сол}}$  поглощенный изотермической поверхностью  $T_1$  частично излучается в открытый космос  $Q_{\text{изл1}}$ , а частично посредством теплопроводности передается поверхности  $T_2$ :

$$As \cdot S_0 \cdot F_1 \cdot \sin \alpha + \frac{\lambda \cdot F_{12}}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_1 \cdot T_1^4 = 0.$$

В изотермической плоскости  $T_2$  кондуктивный тепловой поток от поверхности  $T_1$  посредством теплоотдачи передается в жидкостный контур СТР [3]:

$$\frac{\lambda F_{12}}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) - (\alpha \cdot F_{\text{жк}}) \cdot (T_2 - T_{\text{сред}}) = 0.$$



Тепловая модель фрагмента КА

В изотермической плоскости  $T_3$  тепловой поток подводимый теплоотдачей жидкостного контура от поверхности  $T_2$  посредством теплопроводности передается поверхности  $T_4$ :

$$(\alpha F_{\text{жк}}) \cdot (T_{\text{сред}} - T_3) - \frac{\lambda F_{12}}{\delta} \cdot (T_3 - T_4) = 0.$$

В изотермической плоскости  $T_4$  кондуктивный тепловой поток от поверхности  $T_3$  излучается в открытый космос  $Q_{\text{изл2}}$ :

$$\frac{\lambda F_{34}}{\delta} \cdot (T_3 - T_4) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{34} \cdot T_4^4 = 0.$$

Тогда система уравнений комплексной теплопередачи примет вид:

$$\begin{cases} As \cdot S_0 \cdot F_1 \cdot \sin \alpha + \frac{\lambda F}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_1 \cdot T_1^4 = 0; \\ \frac{\lambda F_{12}}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) - (\alpha \cdot F_{\text{жк}}) \cdot (T_2 - T_{\text{сред}}) = 0; \\ (\alpha \cdot F_{\text{жк}}) \cdot (T_{\text{сред}} - T_3) - \frac{\lambda F_{12}}{\delta} \cdot (T_3 - T_4) = 0; \\ \frac{\lambda F_{34}}{\delta} \cdot (T_3 - T_4) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{34} \cdot T_4^4 = 0. \end{cases}$$

В данной системе ввиду наличия двух процессов теплоотдачи помимо выделенных четырёх изотермических поверхностей  $T_1, T_2, T_3, T_4$  присутствует параметр  $T_{\text{сред}}$ , который характеризует среднюю температуру гидравлического тракта. На первый взгляд, кажется, что систему необходимо дополнить отдельным уравнением, которое будет выполняться относительно параметра  $T_{\text{сред}}$ . Введем дополнительную виртуальную изотермическую плоскость, которая соответствует средней температуре жидкостного контура СТР [4].

Последняя система уравнений тепловых балансов в СТР КА является замкнутой по числу неизвестных  $T_1, T_2, T_3, T_4$ , температур что позволяет вести ее численное решение по заданным определяющим и режимным параметрам и по сути представляет одномерную модель комплексной теплопередачи, что предполагает ее развитие и приложение на двумерный случай (квазитрёхмерный) комплексной теплопередачи СТР КА [5].

### Библиографические ссылки

1. Амосов П. В. Численное моделирование распределения температуры излучающей пластины // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. №2 (13). С.17-21.
2. Делков А. В. Математическое моделирование однофазной системы терморегулирования космического аппарата. Труды XII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». В 7 томах. Том 6. Новосибирск, НГТУ, 2 – 4 октября, 2014, с. 121-123.
3. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
4. 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.
5. Экспериментальное определение термического сопротивления образцов экранно-вакуумной изоляции / Ф. В. Танасиенко, А. А. Рудько, В. В. Басынин // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2013. – Ч. 1. С. 100-102.

### References

1. Amosov P. V. *Chislennoye modelirovaniye raspredeleniya temperatury izluchayushchey plastiny* [Numerical modeling of the temperature distribution of the radiating plate] // *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. № 2 (13). P. 17-21.
2. Delkov A. V. *Matematicheskoye modelirovaniye odnofaznoy sistemy termoregulirovaniya kosmicheskogo apparata* [Mathematical modeling of a single-phase spacecraft thermal control system]. Proceedings of the XII International Conference "Actual Problems of Electronic Instrumentation". In 7 volumes. Volume 6. Novosibirsk, NSTU, October 2-4, 2014, p. 121-123.
3. Emtsev B. T. *Tekhnicheskaya gidromekhanika* [Technical hydromechanics]. M.: Mashinostroenie, 1987. 440 p.
4. Kishkin A. A., Delkov A. V., Zuev A. A., Khodenkov A. A. *Proyektynaya optimizatsiya teplotekhnicheskikh sistem, rabotayushchikh po zamknutomu konturu* [Design optimization of heat engineering systems operating in a closed circuit]. *Vestnik SibGAU im. M. F. Reshetneva* [Bulletin of SibGAU]. № 5(45); Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2012. P. 34-38.
5. Tanasienko F. V., Rudko A. A., Basyinin V. V. *Eksperimental'noye opredeleniye termicheskogo soprotivleniya obraztsov ekranno-vakuumnoy izolyatsii* [Experimental determination of the thermal resistance of samples of screen-vacuum insulation]. *Reshetnevskiy chteniye: materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev readings: materials of the XVII Intern. scientific conf.]. Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2013. Part 1. P. 100-102.

© Делков А. В., Танасиенко Ф. В., Мелкозеров М. Г., 2022

УДК 629.7

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ СТУПЕНИ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ

А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко, А. А. Шагеева, 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: delkov-mx01@mail.ru

*В данной работе рассмотрены основы численного интегрирования уравнения относительного движения потока рабочего тела ступени центробежной микротурбины по внутренней, относительной линии тока совместно с уравнением энергии в термодинамических параметрах. Потери на трение предполагаются распределенными равномерно по длине внутренней линии тока и количественно определяется коэффициентом потерь на трение в рабочем колесе, определяемым справочным значением или экспериментальной продувкой. Учет локальных потерь на трение позволяет корректировать энтальпии потока на каждом шаге интегрирования, что теоретически позволяет уточнять решение с учетом подогрева трением.*

*Ключевые слова: радиус входа и выхода рабочего колеса, лопаточный угол, радиус центров профилирования, радиус профилирования, энтальпия, относительная скорость, потери на трение.*

## DIFFERENTIAL MODEL OF FRICTION LOSSES IN THE IMPELLER OF A CENTRIPETAL TURBINE STAGE

A. V. Delkov, Yu. N. Shevchenko, A. A. Shageeva, M. U. Abdullayev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*In this paper, the basics of numerical integration of the equation of relative motion of the working fluid flow of a centrifugal microturbine stage along an internal, relative current line together with the energy equation in thermodynamic parameters are considered. Friction losses are assumed to be evenly distributed along the length of the internal current line and are quantified by the coefficient of friction losses in the impeller, determined by a reference value or experimental purging. Taking into account local friction losses allows you to adjust the enthalpy of the flow at each step of integration, which theoretically allows you to refine the solution taking into account friction heating.*

*Keywords: impeller inlet and outlet radius, blade angle, radius of profiling centers, profiling radius, enthalpy, relative velocity, friction losses.*

Расчетная модель радиальной ступени микротурбины представлена на рисунке. Критический угол инверсии радиуса профилирования лопатки определяется исходными данными для профилирования и рассмотрен ниже по тексту. Для радиальных турбин с  $\beta_{1,l} = 90^\circ$  используется в основном закрыточное профилирование [1].

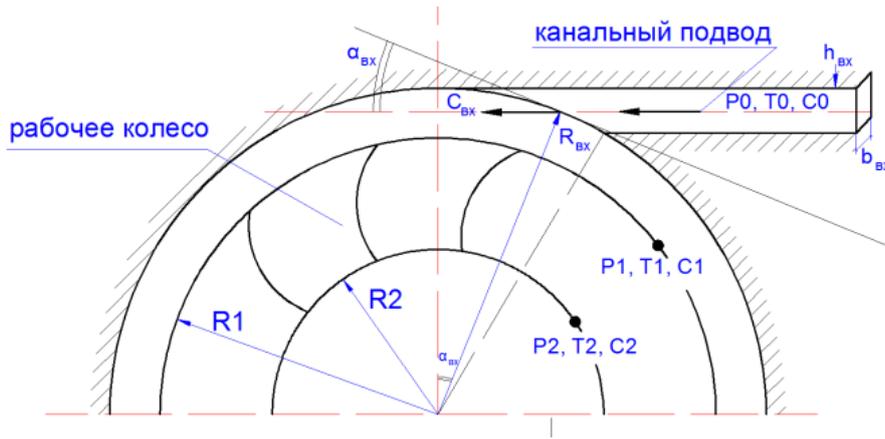
Для каждого рассматриваемого профиля исходными данными являются:

$R_1$  – радиус входа в турбину;

$R_2$  – радиус выхода турбины;

$\beta_{1,l}$  – лопаточный угол на входе в рабочее колесо;

$\beta_{2,l}$  – лопаточный угол на выходе в рабочее колесо.



Расчетная схема радиальной ступени

Радиус лопатки на докритических углах определяется:

$$R_l = \frac{(R_1^2 - R_2^2)}{2(R_1 \cos \beta_{1,l} - R_2 \cos \beta_{2,l})};$$

где критический угол:

$$\beta_{1,лкр} = \arccos \left( \frac{R_2}{R_1} \cos \beta_{2,l} \right).$$

Радиус расположения центров для лопаточных окружностей рассчитывается:

$$R_y = R_l^2 + R_1^2 - 2R_l R_1 \cos \beta_{1,l};$$

$$R_y = R_l^2 + R_2^2 - 2R_l R_2 \cos \beta_{2,l};$$

Для закритических углов радиус лопатки определяется:

$$R_l = \frac{R_1^2 - R_2^2}{2 \left[ R_1 \cos(180^\circ - \beta_{1,l}) - R_2 \cos(180^\circ - \beta_{2,l}) \right]};$$

Радиус центров для лопаточных окружностей по одной из формул:

$$R_y^2 = R_1^2 - R_l^2 - 2R_l R_1 (180^\circ - \beta_{1,l});$$

$$R_y^2 = R_2^2 - R_l^2 - 2R_l R_2 (180^\circ - \beta_{2,l}).$$

Для определения аналитической функции и дифференциальной характеристики линии тока в относительном движении в рабочем колесе (совпадающей по форме с дугой лопаточной образующей), исходными данными являются:

$R_l$  – радиус дуги лопатки;

$R_y$  – радиус центров дуг лопаточных окружностей.

Координаты точки В (нижняя (крайняя) точка лопаточного профиля на выходном диаметре  $2R_1$ ) определяются по выражению:

$$X_B = -2a \cdot R_1 - 2\sqrt{R_2(a^2 + 1) - R_1^2}; \quad Y_B = aX_B + R_1;$$

$$a = - \left( \frac{1}{\operatorname{tg}(180^\circ - \beta_{1,l} - \beta_{2,l})} + \frac{R_1}{R_2 (\sin(180^\circ - \beta_{2,l}))} \right).$$

Следует допустить, что потери на трение в среднем равномерно распределены по длине лопатки, что позволяет реализовать алгоритм учета возврата теплоты потерь на шаге интегрирования [2]:

$$\Delta h_{il} = \zeta_k \cdot \frac{W_2^2}{2} \cdot \frac{1}{l_l};$$

Тогда система интегральных уравнений для итераций для учета возврата тепла трения в рабочем колесе центростремительной ступени примет вид аналогичный:

$$\frac{P_{i+1}}{p_{i+1}} = \frac{P_i}{p_i} - \frac{k-1}{k} \left( \frac{U_i^2 - U_{i+1}^2}{2} + \frac{W_{i+1}^2 - W_i^2}{2} \right) - \Delta h_{iR};$$

$$C_p T_{i+1} = i_{i+1} = i_i - \left( \frac{U_i^2 - U_{i+1}^2}{2} + \frac{W_{i+1}^2 - W_i^2}{2} \right) - \Delta h_{iR};$$

$$p_{i+1} = \frac{P_{i+1}}{RT_{i+1}};$$

где  $i = 0$  – соответствует  $R_1$ ;  $i = n$  – радиус выхода  $R_2$ .

Предложенный алгоритм выполнен в допущении, что потери на трение равномерно распределены по длине лопатки и определяются интегрально коэффициентом потерь рабочего колеса [3]. Однако потери можно в перспективе расчетно генерировать, используя интегральное соотношение импульсов пространственного пограничного слоя, что является перспективно-верификационной задачей.

### Библиографические ссылки

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. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. Учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 496 с.
3. Проектирование системы пассивного охлаждения бортового комплекса космического аппарата / Шилкин О. В., Кишкин А. А., Зуев А. А., Делков А. В., Лавров Н. А. // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.

### References

1. *Organicheskiy tsikl Renkina v avtonomnoy teploenergeticheskoy sisteme* [Organic Rankine cycle in an autonomous heat and power system]: monograph / A. A. Kishkin, O. V. Shilkin, A. V. Delkov et al. Reshetnev Siberian State University. Krasnoyarsk, 2019. 234 p.
2. Zarubin V. S. *Matematicheskoye modelirovaniye v tekhnike* [Mathematical modeling in engineering]. Proc. for universities. M.: Publishing house of MSTU, 2003. 496 p.
3. *Proyektirovaniye sistemy passivnogo okhlazhdeniya bortovogo kompleksa kosmicheskogo apparata* [Designing a passive cooling system for the onboard complex of a spacecraft] / Shilkin O. V., Kishkin A. A., Zuev A. A., Delkov A. V., Lavrov N. A. // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2021. Vol. 28. № 2. P. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.

© Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Шагеева А. А., Абдуллаев М. У., 2022

УДК 662.19; 539.91

## ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ТЕРМИТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

М. О. Енков<sup>1</sup>, Т. И. Горбенко<sup>1</sup>, М. В. Горбенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: enkov\_maksim@mail.ru

*Двигатели малой тяги используются в качестве регулирующих устройств для различной космической техники. В работе рассмотрены топлива на основе термитных систем для двигателей подобного рода.*

*Ключевые слова: горение, термитные системы, двигатель малой тяги, удельный импульс.*

## FUEL BASED ON THERMITE SYSTEMS FOR SMALL THRUST ENGINES

M. O. Enkov<sup>1</sup>, T. I. Gorbenko<sup>1</sup>, M. V. Gorbenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University  
36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: enkov\_maksim@mail.ru

*Small thrust engines are used as control devices for various space technology. The paper considers fuels based on thermite systems for engines of this kind.*

*Keywords: combustion, thermite systems, small thrust engine, specific impulse.*

Твердотопливные ракетные двигатели широко используются в космической отрасли. Ракетные двигатели малой тяги находят применение при проведении «вспомогательных» операций – аварийное спасение космонавтов на начальном этапе вывода космического корабля на околоземную орбиту, разделение ступеней ракетносителя (РН), сброса головных обтекателей (РН), для раскрутки ступеней РН и других операций [1].

Литературный обзор за последние пять–десять лет [2–3] показывает интерес российских и зарубежных исследователей к возможности использования в качестве одного из вариантов твердых ракетных топлив – термитные системы (ТС). В термитных системах в качестве горючего выступает металл, а в качестве окислителя – оксид другого металла. ТС сочетают в себе высокую энергетику, широкие пределы регулирования скорости реакций и разные соотношения газообразных и конденсированных продуктов реакций.

Актуальной задачей является разработка составов термитных систем с пониженным содержанием конденсированных продуктов сгорания при сохранении высоких энергетических характеристик топлива.

Для исследования выбраны термитные системы на основе йодата кальция, содержащие алюминий, бор и титан [4]. Расчет термодинамических параметров ТС проведен с использованием программного комплекса TERRA [5].

Термодинамические расчеты проведены при давлении в камере сгорания 4 МПа (табл. 1) и 7 МПа (табл. 2), а на срезе сопла 0,1 МПа. Выявлены зависимости следующих параметров: адиабатической температуры горения ( $T_{ад}$ ), значений удельного импульса ( $I_{уд}$ ), скорости истечения продуктов сгорания ( $W$ ), массовой доли конденсированных фаз ( $z$ ).

Таблица 1

## Теплофизические данные и содержания продуктов сгорания в процессе горения исследуемых ТС при давлении в камере сгорания 4 МПа

Компоненты ТС	Соотношение, масс. %	$T_{ад}$ , К.	$I_{уд}$ , м/с.	$W$ , м/с.	$z$ .
CaI <sub>2</sub> O <sub>6</sub> /Al	40/60	2828,02	642,906	539	0,605
	60/40	3043,12	1177,61	1041	0,24
	80/20	4552,31	1372,07	1219	0,387
CaI <sub>2</sub> O <sub>6</sub> /B	75/25	2565,49	944,868	823	0,219
	80/20	2565,49	1067,86	945	0,139
	85/15	2565,49	1178,09	1052	0,058
CaI <sub>2</sub> O <sub>6</sub> /Ti	75/25	4523,99	1233,98	1099	0,447
	80/20	3855,7	1228,57	1097	0,431
	85/15	3066,59	1156,19	1036	0,372

Таблица 2

## Теплофизические данные и содержания продуктов сгорания в процессе горения исследуемых ТС при давлении в камере сгорания 7 МПа

Компоненты ТС	Соотношение, масс. %	$T_{ад}$ , К.	$I_{уд}$ , м/с.	$W$ , м/с.	$z$ .
CaI <sub>2</sub> O <sub>6</sub> /Al	50/50	3095,34	973,317	861	0,429
	60/40	3192,84	1230,21	1105	0,252
	80/20	4713,12	1433,95	1295	0,393
CaI <sub>2</sub> O <sub>6</sub> /B	75/25	2681,9	964,85	847	0,223
	80/20	2681,9	1107,1	992	0,146
	85/15	2681,9	1233,18	1118	0,069
CaI <sub>2</sub> O <sub>6</sub> /Ti	60/40	4475,6	1077,1	966	0,533
	75/25	4644,85	1290,36	1167	0,454
	80/20	3902,62	1288,16	1168	0,435

Результаты расчетов показали существенную зависимость  $T_{ад}$  от соотношения содержания окислитель/горючее в составах ТС. Так изменение содержания CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Al от значения 40/60 до 80/20 приводит к возрастанию  $T_{ад}$  от 2828 К до 4552 К при  $p = 4$  МПа. Повышение давления до 7 МПа показывает незначительный рост  $T_{ад}$  на 123–161 К. Адиабатическая температура горения в ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/B не изменяется с ростом содержания CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub> от 75 до 85 масс. %. Адиабатическая температура горения  $T_{ад}$  одинакова во всех соотношениях компонентов и зависит только от давления. Максимальная адиабатическая температура горения в ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Ti наблюдается при соотношении компонентов 75/25 и давлении 7 МПа, и равна 4644 К.

В исследованном диапазоне соотношений компонентов ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Al, удельный импульс возрастает в 1,46 раза при  $p = 4$  МПа. Повышение давления от 4 до 7 МПа позволяет повысить удельный импульс на 35–62 м/с. Удельный импульс ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/B повышается с увеличением давления и содержания йодата кальция. В зависимости от давления  $I_{уд}$  может повышаться на 20–55 м/с. Удельный импульс в ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Ti имеет максимальное значение 1290,36 м/с при соотношении компонентов 75/25 и давлении 7 МПа. Дальнейшее уменьшение титана в ТС приводит к уменьшению значений  $I_{уд}$ .

Скорость истечения продуктов сгорания в ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Al повышается на 150–225 м/с при постепенном увеличении содержания йодата кальция, а увеличение давления с 4 до 7 МПа приводит к возрастанию  $W$  на 45–76 м/с. Скорость истечения продуктов сгорания ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/B повышается, при увеличении давления и содержания йодата кальция в термитной системе. Минимальная величина  $W$  равняется 823 м/с, а максимальная 1118 м/с. Соотношения компонентов 75/25 и 80/20 в ТС CaI<sub>2</sub>O<sub>6</sub>/Ti показывают наиболее высокие скорости истечения продуктов сгорания в зависимости от давления.

Массовая доля конденсированных фаз является важным показателем, влияющим на качество работы двигателя. Минимальное значение  $z$  в термитной системе  $\text{CaI}_2\text{O}_6/\text{Al}$ , достигается при соотношении компонентов 60/40 при давлении 4 МПа. В ТС  $\text{CaI}_2\text{O}_6/\text{B}$  массовая доля конденсированных фаз уменьшается с 0,223 до 0,058 при уменьшении содержания бора в ТС. Увеличение давления приводит к незначительному повышению  $z$  на 0,004–0,011 в рассмотренном соотношении компонентов. Уменьшение содержания титана в ТС  $\text{CaI}_2\text{O}_6/\text{Ti}$  приводит к понижению значений массовой доли конденсированных фаз, от 0,533 до 0,372.

Системы на основе йодата кальция, содержащие алюминий, бор и титан, имеют повышенные значения  $I_{\text{уд}}$ ,  $W$  и наименьшие  $z$  при соотношении компонентов 80/20, или близкие соотношения к указанному значению. Термитная система  $\text{CaI}_2\text{O}_6/\text{Al}$  с соотношением компонентов 80/20 при давлении 7 МПа имеет более высокие значения  $I_{\text{уд}}$  (1433,95 м/с) и  $W$  (1295 м/с) по отношению к другим исследованным в данной работе системам. Минимальной массовой долей конденсированных фаз обладает ТС  $\text{CaI}_2\text{O}_6/\text{B}$  с соотношением компонентов 85/15,  $z = 0,058$  и 0,069 при давлениях 4 МПа и 7 МПа соответственно.

### Библиографические ссылки

1. Назаров Г. А., Прищепа В. И. Космические твердотопливные двигатели. М.: Знание, 1980. 63 с.
2. К. А. Моногаров, Д. Б. Мееров, Ю. В. Фролов, А. Н. Пивкина Особенности горения наноразмерных термитов в пироагрегаторах // Химическая физика, 2019, том 38, № 8, – С. 40–45.
3. Имховик Н. А., Селиванов В. В., Симонов А. К., Сергеева А. И., Яшин В.Б. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов («High-Density Reactive Materials») и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия // Вооружение и экономика, 2014, № 1 (26), – С. 53-63.
4. Haiyang Wang, Dylan J. Kline, Miles Rehwoldt, Michael R. Zachariah Ignition and Combustion Characterization of  $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ -based Pyrotechnic Composites with B, Al, and Ti // Propellants Explos. Pyrotech. 2018, 43, 1–10. DOI:10.1002/prep.201800041
5. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.

### References

1. Nazarov G. A., Prishchepa V. I. Cosmic solid propellant engines. M.: Knowledge, 1980. 63 p.
2. K. A. Monogarov, D. B. Meerov, Yu. V. Frolov, A. N. Pivkina Peculiarities of combustion of nanosized thermites in pyroheaters // Chemical Physics, 2019, vol. 38, no. 8, pp. 40–45.
3. Imkhovik N.A., Selivanov V.V., Simonov A.K., Sergeeva A.I., Yashin V.B. On research on the development of new high-density reactive materials abroad (“High-Density Reactive Materials”) and their use in high-power ammunition // Armament and Economics, 2014, No. 1 (26), pp. 53-63.
4. Haiyang Wang, Dylan J. Kline, Miles Rehwoldt, Michael R. Zachariah Ignition and Combustion Characterization of  $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ -based Pyrotechnic Composites with B, Al, and Ti // Propellants Explos. Pyrotech. 2018, 43, 1–10. DOI:10.1002/prep.201800041
5. Belov G.V., Trusov B.G. Thermodynamic modeling of chemically reacting systems. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2013. 96 p.

© Енков М. О., Горбенко Т. И., Горбенко М. В., 2022

УДК 621.56

## СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ДЫМОУДАЛЕНИЯ: НАЗНАЧЕНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

К. И. Капушак, А. И. Келлер

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: shegivara01@gmail.com

*Пожары – неконтролируемая и опасная чрезвычайная ситуация, которая способна причинить вред людям и сооружениям. Современные системы пожаротушения не стоят на месте, вводятся новые технологии, системы, которые помогают минимизировать ущерб, причиненный пожаром. В данной статье рассматривается одна из систем, способная уменьшить риски, возникающие во время возгорания чего-либо в помещении. Одна из таких технологий – система автоматического дымоудаления.*

*Ключевые слова: вентиляционный канал, пожар, СДУ, покрытие, заслонка, вентилятор, двигатель, подрядчик.*

## EMERGENCY SMOKE REMOVAL SYSTEM: PURPOSE, DESIGN, PRINCIPLE OF OPERATION

K. I. Kapuschak, A. I. Keller

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shegivara01@gmail.com

*Fires are an uncontrollable and dangerous emergency that can cause harm to people and structures. Modern fire extinguishing systems do not stand still, new technologies are introduced, systems that help minimize the damage caused by fire. This article discusses one of the systems that can reduce the risks that arise during the fire of something in the room. One of these technologies is an automatic smoke removal system.*

*Keywords: ventilation duct, fire, SDU, coating, damper, fan, engine, contractor.*

Строительство многоэтажных зданий, промышленных комплексов и торгов развлекательных центров требует к себе особого внимания по части проектирования коммуникаций, систем микроклимата, вентиляции и систем активной безопасности. Для монтажа таких ответственных систем компания подрядчик обязана получить лицензию в управлении МЧС по пожарной безопасности. Ведь при возникновении чрезвычайной ситуации, в частности пожара, последствия от некачественного проектирования и халатности со стороны подрядчика могут иметь непредсказуемые последствия [1].

Система дымоудаления (СДУ) – комплексная система, состоящая из приточной и вытяжной вентиляции, удаляющая продукты горения из аварийного помещения тем самым предотвращая отравление угарным газом и обеспечивающая приемлемую для эвакуации температуру. Такая система должна проходить постоянные проверки и сертификацию надлежащими органами [2].

Принцип работы таких систем основан на автоматике, которая должна срабатывать моментально во время возникновения пожара (см. рисунок). При возникновении задымления помещения, срабатывают специальные датчики, которые подают команды (электрический ток) на исполнитель, выполненный в виде двигателя, он открывает люки на крыше, чтобы дым вытягивался на улицу при помощи мощных вентиляторов, и перекрывает соседние вентиляционные каналы, для предотвращения попадания продуктов горения в соседние комнаты [3].

Существуют два вида систем дымоудаления: статические и динамические. Статическая система представляет собой группу заслонок, которые, при срабатывании датчиков дыма, перекрывают вентиляционные каналы, тем самым отсекают поток поступающего воздуха (кислорода) в помещение, который способствует горению. Обеспечивает изоляцию помещения, в котором произошло возгорание от других комнат, присоединенных к этой же системе подачи воздуха. Динамическая система схожа со статической, но всё же имеет некоторые доработки. В этой системе происходит не только изоляция места возгорания, но и дополнительная система дымоудаления. При помощи мощных вентиляторов, расположенных на крыше здания происходит вытягивание дыма из помещения и снабжение соседних комнат дополнительным давлением, чтобы огонь не мог распространиться на соседние комнаты [4].



Схема работы динамической системы дымоудаления

Такие системы продумываются и устанавливаются еще на этапе постройки здания, чтобы разместить все требуемые модули и наладить коммуникации с системой подачи воздуха. Для системы дымоудаления используют специальные вентиляционные каналы, которые должны иметь толщину не менее 1,4 мм, а также они должны быть специальным огнеупорным покрытием. Делается это для того, чтобы во время процесса дымоудаления не произошло прогорание вентиляционных каналов, так как во время горения выделяется очень много тепла способное проплавить тонкую оцинковку, из которой, в основном, выполняется вентиляция.

Установка и пуско-наладочные работы должны производиться только в присутствии подготовленных специалистов, сдавших специальные нормативы, а также получившие лицензию от МЧС [5].

Система дымоудаления может спасти много людей от отравления угарными газами и другими различными вредными веществами, её нужно ставить во все зданиях, где постоянно находятся люди. Она требует постоянного контроля, чтобы в момент срабатывания исключить все внештатные ситуации, которые могут повлиять на корректную работу оборудования.

#### Библиографические ссылки

1. Системы дымоудаления [Электронный ресурс]. URL: <https://cs-com.ru/sistemy-bezopasnosti/sistemy-dymoudaleniya/> (дата обращения 06.09.2022).
2. Устройство и монтаж противодымной вентиляции [Электронный ресурс]. URL: <https://sovet-ingenera.com/vent/oborud/sistema-dymoudaleniya.html> (дата обращения 06.09.2022)
3. Принцип работы, отличия и виды систем дымоудаления [Электронный ресурс]. URL: <https://ceds.ru/blog/vse-o-sistemah-dymoudaleniya/#11> (дата обращения 06.09.2022)
4. Системы аварийного дымоудаления [Электронный ресурс]. URL: <https://in-bez.ru/articles/sistema-dymoudaleniya/> (дата обращения 06.09.2022)

5. Жилин О. И. Противодымная защита зданий и сооружений // Энергобезопасность и энергосбережение. 2006. №6. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/protivodymnaya-zaschita-zdaniy-i-sooruzheniy> (дата обращения 06.09.2022)

### References

1. *Sistemi dymoudaleniya* [Smoke exhaust systems] Available at: <https://cs-com.ru/sistemy-bezopasnosti/sistemy-dymoudaleniya/> (accessed 06.09.2022).

2. *Ustroistvo montaj protivodimnoy ventilyacii* [Smoke exhaust systems: installation of smoke ventilation] Available at: <https://sovet-ingenera.com/vent/oborud/sistema-dymoudaleniya.html> (accessed 06.09.2022).

3. Princip raboti, otlichiya I vidy system dymoudaleniya [Smoke exhaust systems: principle of operation, differences and types] Available at: <https://www.promventholod.ru/tekhnicheskaya-biblioteka/chto-takoe-precizionnyy-konditsioner.html> (accessed 06.09.2022).

4. *Sistemi avariynogo dymoudaleniya* [Smoke exhaust systems] Available at: <https://in-bez.ru/articles/sistema-dymoudaleniya/> (accessed 06.09.2022).

5. *Zhilin O. I. Protivodymnaya zashhita zdaniy I sooruzhenij [Smoke protection of buildings and structures] Jenergobezopasnost I jenergoberezhenie* Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/protivodymnaya-zaschita-zdaniy-i-sooruzheniy/viewer> (accessed 06.09.2022).

© Капушак К. И., Келлер А. И., 2022

УДК 621.56

## ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ КАНАЛЬНОГО ТИПА

К. И. Капушчак, А. И. Келлер

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: shegivara01@gmail.com

*Техника для кондиционирования воздуха с каждым годом все больше и больше интегрируется в жизнедеятельность человека. Большинство людей, хотя бы один раз в своей жизни использовали кондиционер, для того чтобы изменить температуру в пребывающих ими помещениях. Обычные сплит-системы знакомы многим обывателям, но существует более мощная и эффективная система охлаждения воздуха – канальный кондиционер. Данный вид климатической установки может быть выгодней в эксплуатации, чем его предшественник, так как она одна может охлаждать несколько помещений.*

*Ключевые слова: холодопроизводительность, микроклимат, канальный, кондиционер, фреонопровод, компрессор, сплит-система.*

## FEATURES AND ADVANTAGES OF DUCT TYPE AIR CONDITIONING SYSTEMS

K. I. Kapushchak, A. I. Keller

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shegivara01@gmail.com

*Equipment for air conditioning every year is more and more integrated into human life. Most people, at least once in their lives, used an air conditioner to change the temperature in the rooms they are staying. Conventional split systems are familiar to many ordinary people, but there is a more powerful and effective air-cooling system – a channel air conditioner. This type of air conditioning unit can be more profitable to operate than its predecessor, since it alone can cool several rooms.*

*Keywords: cooling capacity, microclimate, duct, air conditioner, freon pipeline, compressor, split system.*

С каждым годом потребность в установке климатического оборудования показывает стабильный рост. Это неудивительно, ведь мир интенсивно повышает количество цифрового оборудования, а где техника – там и повышенное тепловыделение. Но не только техника испытывает потребность в поддержании заданных температур, повышенная температура и влажность оказывает влияние и на человека, уменьшая работоспособность и увеличивая усталость [1].

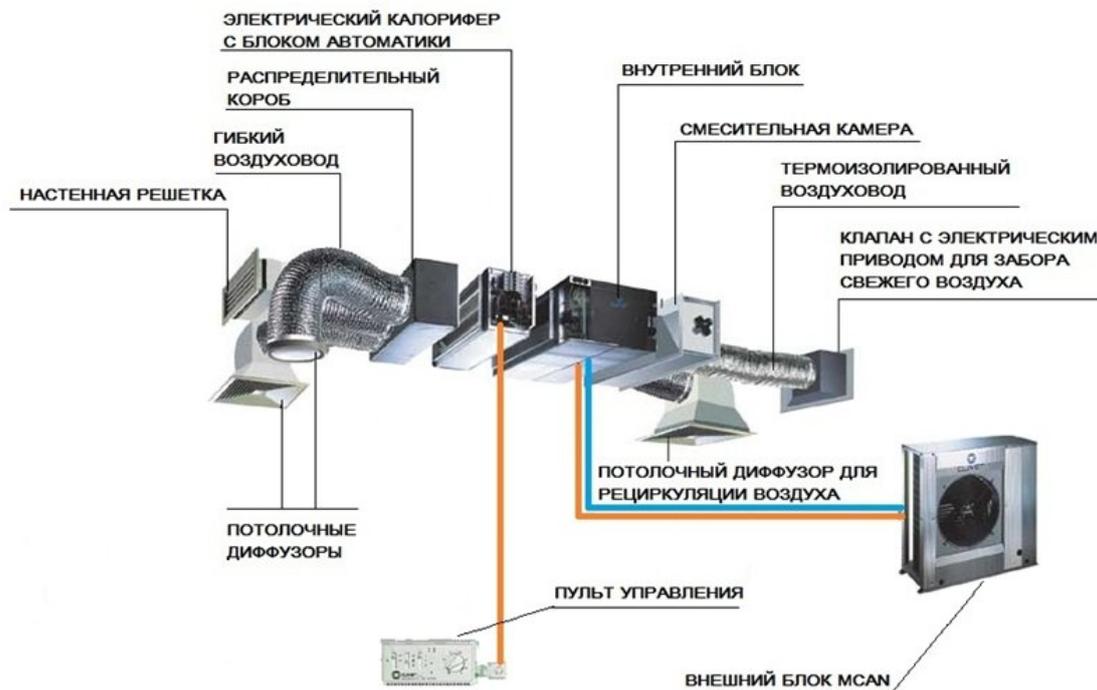
Сейчас набирает популярность тренд на применение центральной вентиляции, реализованной с помощью воздуховодов. Как часто бывает, при выборе кондиционирующих систем, заказчик пытается максимально сэкономить, и выбирает не высокотехнологичные VRF системы, а системы, построенные вокруг канальных блоков сплит систем большой мощности. Такие системы просты в монтаже и эксплуатации, не требуют специально подготовленного персонала для настройки и повседневного использования [2].

Канальный кондиционер достаточно неоднозначное понятие, но на самом деле подразумевает под собой обычную сплит-систему, отличие заключается в конструкции внутреннего блока. Во внешнем блоке находятся компрессор, теплообменник конденсатора, управляющая электроника и дросселирующий клапан. Опционально может оснащаться зимним пакетом, позволяющим работать в зимнее время года.

Преимуществом таких систем является отсутствие каких-либо видимых элементов установки, ведь она целиком находится под фальшпотолком. А наличие вентиляционных каналов позволяет подво-

дуть готовый воздух на большие расстояния, это зависит лишь от мощности установки, которая в наше время начинается от 5кВт и заканчивается 55кВт холодопроизводительности. Немало важным достоинством считается возможность подмешивания свежего воздуха, проходящего через фильтр грубой очистки.

Монтаж кондиционера начинается с выбора места для внешнего блока. Желательно располагать блок в месте, где на него не будут попадать прямые солнечные лучи, но при этом будет непосредственный доступ к штуцерам и управляющей плате для проведения технического обслуживания. Далее происходит установка внутреннего блока, как правило, его крепят к потолку с помощью винтов, прокладывают фреоновый провод, для которого заранее были сделаны отверстия. Далее идет закладывание вентиляции и коммуникаций. Запуск и настройка оборудования, так как данный вид кондиционера относится к классу полупромышленных, то их установкой, с сохранением гарантии, имеют права заниматься только специально подготовленные работники [3].



Строение канальной системы кондиционирования

Такие установки имеют ряд особенностей:

- невозможность настройки индивидуального микроклимата в каждом помещении.
- сложность расчета потерь мощности из-за вентиляционных каналов
- сложности при монтаже и разведении коммуникаций

Что говорит нам о высокой цене на установку таких систем, ведь ошибки при монтаже и расчете нужной мощности могут сказаться на ресурсе оборудования [4-5].

Такие системы подойдут для небольших офисных зданий, маломощных серверных и частных домов, так как ценник на прецизионные и VRF системы слишком велик и их установка для таких целей не рентабельна. А все минусы и особенности перекрываются долговечностью и точностью параметров при качественном расчете и монтаже.

### Библиографические ссылки

1. Схемы подключения и монтаж канального кондиционера [Электронный ресурс]. URL: <https://dantex.ru/articles/skhemy-podklyucheniya-i-montazh-kanalnogo-konditsionera/> (дата обращения 07.09.2022).

2. Канальный кондиционер и приточная установка. Как жить вместе? [Электронный ресурс]. URL: [https://ruclimat.ru/about/kondicionirovanie\\_i\\_ventilyaciya/kanalnuu\\_kondicioner\\_i\\_pritochnaya\\_ustanovka/](https://ruclimat.ru/about/kondicionirovanie_i_ventilyaciya/kanalnuu_kondicioner_i_pritochnaya_ustanovka/) (дата обращения 07.09.2022)

3. Монтаж канальных кондиционеров [Электронный ресурс]. URL: <https://homengineer.ru/conditioning/montazh/kanalnyh-konditsionerov> (дата обращения 07.09.2022)

4. Схема строения канальной системы кондиционирования [Электронный ресурс]. URL: <https://dearhouse.ru/klimat/kanalnyj-kondicioner-ustanovka/> (дата обращения 07.09.2022)

5. Приточная вентиляция, совмещенная с канальным кондиционером [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/501344/> (дата обращения 07.09.2022)

### References

1. *Shemi podklucheniya I montaj kanal'nogo kondicionera* [Connection diagrams and installation of a channel air conditioner] Available at: <https://dantex.ru/articles/skhemy-podklyucheniya-i-montazh-kanalnogo-konditsionera/> (accessed 07.09.2022).

2. *Kanalnyj kondicioner I pritochnaya ustanovka. Kak jit' vmeste?* [Channel air conditioner and supply unit. How to live together?] Available at: [https://ruclimat.ru/about/kondicionirovanie\\_i\\_ventilyaciya/kanalnyu\\_kondicioner\\_i\\_pritochnaya\\_ustanovka/](https://ruclimat.ru/about/kondicionirovanie_i_ventilyaciya/kanalnyu_kondicioner_i_pritochnaya_ustanovka/) (accessed 07.09.2022).

3. *Montaj kanal'nih kondicionerov* [Installation of channel air conditioners] Available at: <https://homengineer.ru/conditioning/montazh/kanalnyh-konditsionerov> (accessed 07.09.2022).

4. *Shema stroeniya kanal'noy sistemi kondicionirovaniya* [Scheme of the structure of the channel air conditioning system] Available at: <https://dearhouse.ru/klimat/kanalnyj-kondicioner-ustanovka/> (accessed 07.09.2022).

5. *Pritochnaya ventilyaciya, sovmeshhennaya s kanal'nym kondicionerom* [Supply ventilation combined with duct air conditioner] Available at: <https://habr.com/ru/post/501344/> (accessed 07.09.2022).

© Капушак К. И., Келлер А. И., 2022

УДК 544.14

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

А. И. Кругленя, А. П. Деткина

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

*В данной статье рассматривается основное средство измерения температуры в автоматизированных системах и промышленности – термоэлектрический преобразователь (термопара).*

*Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, сплав, термоэлектрический эффект, автоматизация.*

## THE USE OF THERMOELECTRIC CONVERTERS IN AUTOMATED SYSTEMS

A. I. Kruglenya, A. P. Detkina

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

*This article discusses the main means of measuring temperature in automated systems and industry – a thermoelectric converter (thermocouple).*

*Keywords: thermoelectric converter, alloy, thermoelectric effect, automation.*

При автоматизации технологических процессов часто возникает необходимость считывания данных об изменении температуры для того, чтобы загрузить их в систему управления и дальнейшей обработки. Для этих целей необходимы высокоточные датчики с низкой инерцией, способные выдерживать высокие температурные нагрузки в определенном диапазоне измерений. Широко используются термоэлектрические преобразователи, такие как термопары – дифференциальные устройства, преобразующие тепловую энергию в электрическую. Они позволяют проводить точные измерения в довольно широких температурных диапазонах [1].

Термопара конструктивно состоит из двух проволок разных сплавов. Концы этих проводников образуют контакт (горячий спай), выполненный скручиванием, с помощью узкого сварочного шва либо сваркой встык. Свободные концы замыкаются на контакты измерительного прибора или соединяются с автоматическим устройством управления. В точках соединения возникает холодный спай [2]. С целью защиты термоэлектродов от агрессивной среды на них надевают керамические бусы, либо помещают в герметичную капсулу, заполненную инертным газом или жидкостью.

Термопары относятся к классу термоэлектрических преобразователей, принцип действия которых основан на явлении Зеебека: если спаи двух разнородных металлов, образующих замкнутую электрическую цепь, имеют неодинаковую температуру ( $T$  не равно  $T_2$ ), то в цепи протекает электрический ток (рис. 1). Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока.

Существует большое количество термопар различных типов и спаев. Все они имеют разные выходные характеристики, которые ранжируют интервал температур, в котором можно применять ту или иную термопару, и соответствующий выходной сигнал напряжения. (рис. 2). Такая вариативность объясняется тем, что заявленная производителем точность измерений возможна только в определенном диапазоне температур. Именно в этом интервале производитель гарантирует линейную характеристику своего продукта. В других диапазонах зависимость напряжения от температуры может быть нелинейной, а это обязательно отразится на точности. Следует учитывать, что для сплавов, из которых изготовлена термопара, так же существует предельное значение рабочих температур [3].

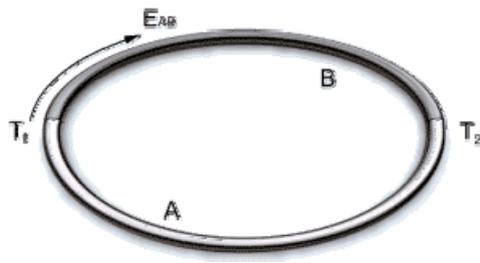


Рис. 1. Явление Зеебека

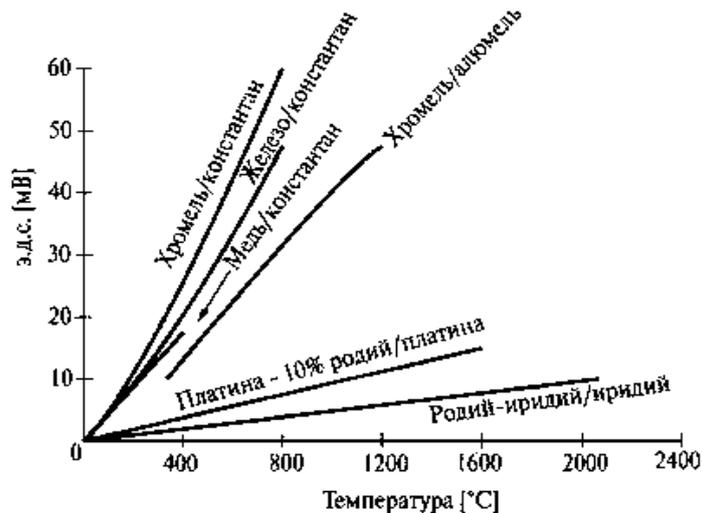


Рис. 2. Зависимости электродвижущей силы от температуры для различных типов термопар

Таким образом, термопары применяются везде, где требуется измерение температуры в технологической среде: в автоматизированных системах управления, газовых котлах, в металлургии, водонагревательных колонках, конвекторах. Использование этих устройств более чем оправдано. При довольно широком температурном диапазоне они обладают высокой точностью измерений и надежностью, а дешевизна и простота обслуживания обеспечивают спрос [1].

### Библиографические ссылки

1. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». 3-е изд., перераб. М.: «Энергия», 1978. 704 с.: ил.
2. Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство/ Никонов Н.В. М.: ООО «МТК «МЕТОТЕХНИКА», 2015. 62 с.: 4 ил., 31 табл.
3. Термопара. Виды, устройство, монтаж термопар [электронный ресурс] / URL.: [https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika\\_1518.html](https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika_1518.html) (дата обращения: 02.09.2022)

### References

1. Thermotechnical measurements and devices. Textbook for high schools on a specialty "Automation of heat and power processes" / Preobrazhensky V.P. 3rd ed., Revised. M.: "Energy", 1978. 704 p.: Ill.
2. Thermocouples. Types, characteristics, designs, production / Nikonov N.V. M.: LLC MTK METOTECHNIKA, 2015. 62p.: 4 ill., 31 tab.
3. Thermocouple. Types, device, installation of thermocouples [electronic resource] / URL.: [https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika\\_1518.html](https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika_1518.html) (accessed: 02/09/2022)

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

## МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ИМПУЛЬСОВ ПРИ РАЗВОРОТЕ ПОТОКА

В. В. Черненко\*, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: 2887722@mail.ru

*Предложен совместный разностно-характеристический метод интегрирования уравнений импульсов и дифференциального соотношения на характеристике для произвольной постановки начальных и граничных условий при развороте потока. Метод позволит повысить точность расчета проточных частей малорасходных лопаточных машин различного назначения.*

*Ключевые слова: уравнение импульсов, пограничный слой, напор, турбулентное течение, дифференциальное соотношение*

## METHOD FOR INTEGRATION OF MOMENTUM EQUATIONS WHEN FLOW REVERSAL

V. V. Chernenko\*, D. V. Chernenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: 2887722@mail.ru

*A joint difference-characteristic method for integrating the momentum equations and the differential relation on the characteristic for an arbitrary statement of initial and boundary conditions at a flow reversal is proposed. The method will improve the accuracy of calculating the flow parts of low-flow vane machines for various purposes.*

*Ключевые слова: momentum equation, boundary layer, head, turbulent flow, differential relation*

Простейший и в тоже время практически важный случай турбулентного пограничного слоя имеется при продольном обтекании плоской пластины. Этот случай встречается при вычислении сопротивления крыла и фюзеляжа самолета, а также в первом приближении: лопаток турбины, насоса или компрессора.

Продольное обтекание плоской пластины характерно тем, что для него градиент давления вдоль стенки равен нулю, и поэтому скорость вне пограничного слоя остается постоянной. Правда, при обтекании только что перечисленных тел градиент давления не всегда равен нулю. Однако до тех пор, пока не возникает отрыва пограничного слоя, сопротивления трения во всех этих случаях мало отличается от сопротивления плоской пластины. Следовательно, закономерности пограничного слоя на плоской пластине являются основой для расчета сопротивления всех тел, у которых при обтекании не возникает резко выраженного отрыва [1-2].

Приближенный метод, применяемый для расчета турбулентного пограничного слоя, основан на использовании уравнения импульсов. Распределение скоростей по толщине пограничного слоя заменяется подходящей аппроксимирующей функцией. Уравнение, получаемое в результате такой замены, дает связь между основными величинами, характеризующими пограничный слой: толщиной вытеснения, толщиной потери импульса и касательным напряжением на стенке [3].

Во многих случаях потенциального течения в ядре потока удобно использовать несколько упрощенную запись уравнений импульсов и дифференциального соотношения.

Для решения используется комбинированная методика конечных разностей и методика характеристик. Система уравнений записывается в конечных разностях с учетом принятых допущений и включает в себя [4-5]:

– уравнение характеристик, учитывая, что  $\Delta\varphi=R\Delta\alpha$

$$\Delta\psi = I\varepsilon\Delta\varphi = I\varepsilon R\Delta\alpha; \tag{1}$$

– дифференциальное соотношение на характеристике

$$\Delta\varepsilon = \left[ (N - KM\varepsilon^2) \frac{2}{M} - \frac{(M+1)\varepsilon R}{M\delta_\varphi^{**}} T(U; \delta_\varphi^{**}; \nu) \right] \Delta\alpha; \tag{2}$$

– первое из уравнений импульсов системы

$$\frac{\partial\delta_\varphi^{**}}{\partial\varphi} + I\varepsilon \frac{\partial\delta_\varphi^{**}}{\partial\psi} + I\delta_\varphi^{**} \frac{\partial\varepsilon}{\partial\psi} = \left[ -(2 + H) \frac{\delta_\varphi^{**}}{U} \frac{\partial U}{\partial\varphi} - (2I - K) \frac{\varepsilon\delta_\varphi^{**}}{U} \frac{\partial U}{\partial\psi} + T(U; \delta_\varphi^{**}; \nu) \right];$$

$$\begin{aligned} M\varepsilon \frac{\partial\delta_\varphi^{**}}{\partial\varphi} + L\varepsilon^2 \frac{\partial\delta_\varphi^{**}}{\partial\psi} + \mu\delta_\varphi^{**} * \frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi} + 2L\delta_\varphi^{**} \varepsilon \frac{\partial\varepsilon}{\partial\psi} = \\ = -[(2L\varepsilon^2 - N)] \frac{\delta_\varphi^{**}}{U} \frac{\partial U}{\partial\psi} + \frac{2M\varepsilon\delta_\varphi^{**}}{U} \frac{\partial U}{\partial\varphi} + \varepsilon T(u; \delta_\varphi^{**}; \nu); \end{aligned}$$

получим

$$\Delta\delta_\varphi^{**} = \left[ (K - 2I) \frac{2\varepsilon\delta_\varphi^{**}}{R} + I\delta_\varphi^{**} \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta R} + T(U; \delta_\varphi^{**}; \nu) + I\varepsilon \frac{\Delta\delta_\varphi^{**}}{\Delta R} \right] R\Delta\alpha, \tag{3}$$

где последнее уравнение записано вдоль кривых  $\psi = \text{const}$  ( $R = \text{const}$ ), т.е. вдоль линии тока. Закон трения определяется по формуле  $T(U; \delta_\varphi^{**}; \nu) = 0,01256 \left( \frac{U\delta_\varphi^{**}}{\nu} \right)^{-0,25}$ .

По выражению (1) определяем точки пресечения характеристик, выходящих из узлов в плоскости  $\alpha(0)$  с плоскостью  $\alpha$  (1) –  $(\Delta\psi_{00})'$ ;  $(\Delta\psi_{01})'$ ;  $(\Delta\psi_{02})'$ ...

По выражению (2) определим приращение  $\Delta\varepsilon$  вдоль каждой характеристики –  $\Delta\varepsilon_{00}$ ;  $\Delta\varepsilon_{01}$ ;  $\Delta\varepsilon_{02}$ ..., значение  $\varepsilon$  в плоскости  $\alpha$  (1) определяется, соответственно, выражениями:

$$(\varepsilon_{10})' = \varepsilon_{00} + \Delta\varepsilon_{00}; (\varepsilon_{11})' = \varepsilon_{01} + \Delta\varepsilon_{01}; (\varepsilon_{12})' = \varepsilon_{02} + \Delta\varepsilon_{02}; \dots$$

Выполним коррекцию значений  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_{10} = \frac{(\varepsilon_{10})' - (\varepsilon_{11})'}{\Delta R - (\Delta\psi_{00})' + (\Delta\psi_{01})'} (\Delta\psi_{00})' + (\varepsilon_{10})'; \tag{4}$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{(\varepsilon_{11})' - (\varepsilon_{12})'}{\Delta R - (\Delta\psi_{01})' + (\Delta\psi_{02})'} (\Delta\psi_{01})' + (\varepsilon_{11})'; \dots$$

Приращение толщины потери импульса  $\Delta\delta_\varphi^{**}$  рассчитывается вдоль координатной линии  $\varphi$  ( $\psi = \text{const}$ ), где разностный аналог производной толщины потери импульса и параметра  $\varepsilon$  рассчитываются по выражениям:

$$\left( \frac{\Delta\delta_\varphi^{**}}{\Delta R} \right)_{00} = \frac{\delta_{\varphi 00}^{**} - \delta_{\varphi 01}^{**}}{\Delta R}; \left( \frac{\Delta\delta_\varphi^{**}}{\Delta R} \right)_{01} = \frac{\delta_{\varphi 01}^{**} - \delta_{\varphi 02}^{**}}{\Delta R}; \dots$$

$$\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta R}\right)_{00} = \frac{\varepsilon_{00} - \varepsilon_{01}}{\Delta R}; \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta R}\right)_{01} = \frac{\varepsilon_{01} - \varepsilon_{02}}{\Delta R}; \dots$$

Толщина потери импульса в следующей плоскости определится

$$\delta_{\varphi_{10}}^{**} = \delta_{\varphi_{00}}^{**} + \Delta\delta_{\varphi_{00}}^{**}; \delta_{\varphi_{11}}^{**} = \delta_{\varphi_{01}}^{**} + \Delta\delta_{\varphi_{01}}^{**}; \dots$$

Далее расчет ведется по основному алгоритму.

Представленная методика позволит дополнить картину течения в ядре потока течением в пограничном слое и получить более точную модель движения рабочего тела в проточной части малорасходного нагнетателя.

### Библиографические ссылки

1. Шлихтинг Г., Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1974, 713 с.
2. Турбулентный пограничный слой в начальном участке трубы в условиях неизотермичности и вдува // А.И. Леонтьев, А.В. Фафурин П. В. Никитин // ТВТ, 1969, том 7, выпуск 2, С.276–283.
3. Исследование донных линий потока при развороте потока // А. А. Кишкин, Е. В. Черненко, А.А. Зуев, В.С. Горошко - Сибирский аэрокосмический журнал. 2009. №3. С. 17-20.
4. Шкарбуль С.Н., Вольчук В.С. Анализ пространственного пограничного слоя в центробежном колесе турбомшины. Энергомашиностроение. 1977. № 1. С. 14-16.
5. Уравнения импульсов трехмерного пограничного слоя / А. А. Кишкин, Д. В. Черненко, Е. В. Черненко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. № 4(140). С. 35-41.

### References

1. Shlichting G., Theory of the boundary layer. M., "Science", 1974, 713 p.
2. Turbulent boundary layer in the initial section of the pipe under conditions of non-isothermicity and injection // A. I. Leontiev, A. V. Fafurin P. V. Nikitin // TVT, 1969, volume 7, issue 2, p.276-283.
3. Investigation of bottom flow lines during flow reversal // A.A., Kishkin, E.V. Chernenko, A.A. Zuev, V.S. Goroshko - Siberian Aerospace Journal. 2009. No.3. p. 17-20.
4. Shkarbul S. N., Volchuk V. S. Analysis of the spatial boundary layer in the centrifugal wheel of a turbomachine. Power plant engineering. 1977. No. 1. p. 14-16.
5. Equations of pulses of a three-dimensional boundary layer / A. A. Kishkin, D. V. Chernenko, E. V. Chernenko // News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences. 2007. No. 4(140). p. 35-41.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., 2022

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

## К РАСЧЕТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕШЕТОК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В. В. Черненко\*, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: 2887722@mail.ru

*В работе описывается методика определения гидродинамических характеристик решетки рабочего колеса центробежного насоса. Представленная методика расчета и анализа характеристик отдельных решеток позволяет произвести оценку их влияния на энергетические качества рабочего колеса.*

*Ключевые слова: центробежный насос, рабочее колесо, энергетические характеристики, проточная часть*

## TO THE CALCULATION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF CENTRIFUGAL PUMPS GRATS

V. V. Chernenko\*, D. V. Chernenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: 2887722@mail.ru

*The article describes a method for determining the hydrodynamic characteristics of the grid of the centrifugal pump impeller. The presented method for calculating and analyzing the characteristics of individual gratings allows us to evaluate their influence on the energy qualities of the impeller.*

*Keywords: centrifugal pump, impeller, energy characteristics, flow part.*

Развитие насосов энергетических установок летательных аппаратов осуществляется в соответствии с основным направлением развития в ракетно-космической отрасли. Повышение энергооборуженности установки уменьшение массогабаритных характеристик узлов и агрегатов. Это приводит к увеличению влияния различных видов потерь на характеристики насоса. И требует совершенствование расчетных методик для учета влияния изменений масштаба.

Учитывая сложность вязких течений в решетках рабочих колес, действительные характеристики отличаются от теоретических на величину гидравлических потерь:

$$H_K = H_T - \Delta H_{гидр}^{кол} = \eta_T * H_T$$

Гидравлические потери зависят от величины и направления относительных скоростей в проточной части решетки и определяются интегралом напряжений трения по ограничивающим поверхностям: цилиндрическим поверхностям лопаток и торцевым поверхностям покрывных дисков.

На сегодняшний день оценка действительных значений напора в зависимости от основных геометрических и режимных параметров решетки в большинстве практических приложений производится на основе полуэмпирических выражений, полученных на основе обобщения и анализа экспериментальных данных.

В работе [1] относительный напор  $\bar{H} = H/u_2$  предлагается оценивать по эмпирической зависимости от коэффициента быстроходности:

$$\bar{H} = 0,72 - 0,22 * 10^{-2} \eta_S$$

где  $\eta_S = 193,3\omega \frac{\sqrt{\dot{V} + \dot{V}_{ут}}}{H * 0,75}$ ,  $\dot{V}$  – расход через насос,  $\dot{V}_{ут}$  – расход внутренних утечек.

При работе насоса в области  $Re_{\omega} < 3 \cdot 10^5$  ( $Re_{\omega} = \frac{\omega D_2^2}{2\nu}$ ) или при вязкости жидкости  $\nu < 1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек напор корректируется по результатам модельных испытаний

$$H_{pac} = H / K_H, \text{ где } K_H = \frac{21,65 + \sqrt{21,65 - 68,72(10 - \lg Re_{\omega})}}{34,36}.$$

Авторами [2] гидравлический КПД предлагается оценивать выражением  $\eta_{\Gamma} = 0,58\eta_{\Gamma}^{0,21}$ , относительный напор для углов  $\beta_{2л} = 70 \dots 80^\circ$

$$\bar{H} = -0,197\gamma^2 + 0,61\gamma + 0,23$$

где  $\gamma$  – густота решетки,

$$\gamma = \frac{z * (D_2 - D_1)}{\pi * (D_2 + D_1) \sin(0,5(\beta_{1л} + \beta_{2л}))}$$

В работе [3] для оценки потерь в относительном движении для рабочего колеса (РК) используется энергетический метод, позволяющий определить потери энергии в каналах РК через толшины потерь энергии  $\delta^{***}$ . Гидравлический КПД в относительном движении выразим через параметры пограничного слоя в виде

$$\bar{\eta}_{z.к} = 1 - \left( \frac{w_2^2}{U_2^2 - U_1^2} \right) * \left( \frac{\sum \delta_l^{***}}{t_2 \sin \beta_{2л}} + \frac{\sum \delta_d^{***}}{b_2} \right)$$

где  $\sum \delta_l^{***}$ ,  $\sum \delta_d^{***}$  – суммы потерь энергии в пространственном пограничном слое на лопатках и дисках РК, соответственно.

В практике насосостроения принято определять гидравлический КПД насоса в абсолютном движении  $\eta_{\Gamma}$  с использованием его значения при расчёте характеристик и проектировании РК насоса. При переходе от абсолютного к относительному движению из интегралов Бернулли в абсолютном и относительном движении для РК насоса имеем:

$$\eta_{z.к} = 1 - \frac{U_2 k_z}{2C_{2U}} (1 - \bar{\eta}_{z.к})$$

Толщину потери энергии пограничного слоя на лопатке и для ограничивающих дисков выразим так:

$$\delta_l^{***} = \int_0^{\delta} \frac{w_x}{w_k} \left( 1 - \frac{w_x^2}{w_k^2} \right) dn; \quad \delta_d^{***} = \int_0^{\delta} \frac{w_x}{w_k} \left( 1 - \frac{w_x^2}{w_k^2} \right) dz$$

Величину потери энергии при течении жидкости по каналам РК малорасходного насоса, в котором реализуется течение без обратных токов и вихрей с учётом, что все потери сосредоточены в пограничном слое, запишем

$$\rho L = \frac{\rho w_k^3}{2\dot{V}_k} \left( \sum \delta_l^{***} + \sum \delta_d^{***} \right)$$

где  $\sum \delta_l^{***}$  и  $\sum \delta_d^{***}$  – суммы толщин потерь энергии на поверхностях лопаток и ограничивающих дисках, соответственно.

Классический способ интегрирования напряжений трения по ограничивающей поверхности криволинейного канала рассмотрен в работе [4], где при интегрировании конечно-разностных аналогов уравнений импульсов ППС; на каждом шаге рассчитывается толщина потери импульса  $\delta_{\phi}^{xl}$  и угол скоса данной линии тока –  $\epsilon$ .

Полный перепад напора записывается как интеграл:

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \int_s \tau_0 \cdot dS = \frac{1}{\rho} \cdot \int_s \tau_0 d\phi d\psi$$

Разложив  $\tau_0$  на проекции, получаем и учитывая, что  $\tau_{0\psi} = \varepsilon \cdot \tau_{0\phi}$ , получим

$$\Delta H = \frac{1}{\rho} \cdot \int_S \sqrt{\tau_{0\phi}^2 + \tau_{0\psi}^2} d\phi d\psi = \frac{1}{\rho} \cdot \int_S \sqrt{\tau_{0\phi}^2 + \varepsilon^2 \cdot \tau_{0\phi}^2} d\phi d\psi = \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{(1 + \varepsilon^2)} \int_S \tau_{0\phi} d\phi d\psi$$

Подставив из закона трения  $\tau_{0\phi}$ , [5], получим выражение для потери напора:

$$\Delta H = \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{(1 + \varepsilon^2)} \int_S \tau_{0\phi} d\phi d\psi = 0,01256 \cdot \sqrt{(1 + \varepsilon^2)} \int_S U^2 \cdot \left( \frac{U \delta_{\phi}^{**}}{\nu} \right)^{-0.25} d\phi d\psi$$

Подставляя найденные значения  $\varepsilon$  и  $\delta_{\phi}^{**}$ , получим значение потерь напора.

Представленный метод расчета пространственного пограничного слоя является достаточно простым и наглядным. Однако существует необходимость в дальнейшей проработке метода для приведения его к виду, позволяющему рассчитывать трехмерное течение рабочего тела в канале произвольной формы.

Следует отметить, что результаты сравнения численной и экспериментальной визуализации показывают сходную картину течения, что косвенно подтверждает справедливость допущений и корректность заключений при построении метода определения поля переносной скорости в межлопаточном канале рабочего колеса.

#### Библиографические ссылки

1. Трехмерный температурный пограничный слой в теории конвективного теплообмена: монография / А. А. Кишкин, А. А. Зуев, А. В. Делков. – Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2016. 308 с.
2. Малорасходные насосы авиационных и космических систем / М. В. Краев, В. А. Лукин, Б. В. Овсянников // М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
3. Гидродинамика малорасходных насосных агрегатов / М. В. Краев, А. А. Кишкин, Д. Н. Сизых // Научное издание. Красноярск: САА, 1998. 157 с.
4. Уравнения импульсов трехмерного пограничного слоя / А. А. Кишкин, Д. В. Черненко, Е. В. Черненко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 4(140). – С. 35-41.
5. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М., 1962. 512 с.

#### References

1. Three-dimensional temperature boundary layer in the theory of convective heat transfer: monograph / A.A. Kishkin, A.A. Zuev, A.V. Delkov. - Krasnoyarsk: SibGU im. Academician M. F. Reshetnev, 2016. 308 p.
2. Low-flow pumps for aviation and space systems / M. V. Kraev, V. A. Lukin, B. V. Ovsyannikov // М.: Mashinostroenie, 1985. 128 p.
3. Hydrodynamics of low-flow pump units / M. V. Kraev, A. A. Kishkin, D. N. Sizykh // Scientific publication. Krasnoyarsk: SAA, 1998. 157 p.
4. Momentum equations for a three-dimensional boundary layer / A. A. Kishkin, D. V. Chernenko, E. V. Chernenko // News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. - 2007. - No. 4 (140). - p. 35-41.
5. Stepanov G. Yu. Hydrodynamics of lattices of turbomachines. M., 1962. 512 p.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., 2022

УДК 629.785

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В НАПРАВЛЯЮЩЕМ АППАРАТЕ МИКРОТУРБИНЫ С ТЕПЛОВЫМ ВОЗВРАТОМ ПО ЭНТАЛЬПИИ

Ю. Н. Шевченко, А. И. Келлер, К. И. Капушчак, А. А. Шагеева

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 рассмотрено конечно-разностная модель потерь на трение в направляющем аппарате микротурбины, позволяющая построить алгоритм численного интегрирования уравнения движения потока с возвратом тепла по энтальпии и коррекции граничных условий потока на каждом шаге интегрирования.*

*Ключевые слова: микротурбина, политропный процесс, работа объемного расширения, коэффициент потерь, энтальпия.*

## MATHEMATICAL MODEL OF DIFFERENTIAL FRICTION LOSSES IN A MICROTURBINE GUIDE WITH THERMAL RETURN BY ENTHALPY

Yu. N. Shevchenko, A. I. Keller, K. I. Kapushchak, A. A. Shageeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*In this paper, we consider a finite-difference model of friction losses in the microturbine guide, which allows us to construct an algorithm for numerical integration of the equation of flow motion with heat return by enthalpy and correction of boundary flow conditions at each integration step.*

*Keywords: microturbine, polytropic process, volumetric expansion operation, loss coefficient, enthalpy.*

Расчетная схема аналогична для всех турбомашин:

0 – обозначение параметров на входе в сопловой (направляющий) аппарат;

1 – параметр на входе в рабочее колесо (РК) микротурбины;

2 – параметры на выходе РК микротурбины,

с тем отличием, что система уравнений движения и неразрывности дополнена уравнениями энергии в термодинамических параметрах и уравнением состояния.

Задача по расчетно-алгоритмическому определению политропной работы за счет дополнительной работы объемного расширения, полученной вследствие подвода тепла от работы трения представляет отдельную научно-практическую задачу удовлетворительно нерешенную на сегодняшний день. В общем турбо-машиностроении принят достаточно широко распространенный подход, предполагающий действительный процесс расширения, протекающий с подводом тепла моделировать кривой  $p v^n = const$ , где  $n$  – показатель политропы, более пологая кривая чем адиабата. Такой подход имеет элемент произвола в назначении коэффициента « $n$ », что снижает точность и достоверность результатов расчета [20], обычно возвращаемая часть работы трения – составляет 15...20 % работы трения.

$$L_{пол} = L_{ад} + H_v,$$

Используемая во многих случаях  $i - s$  диаграммы для расчета турбин существенно упрощает расчеты, хотя в них и не показаны все составляющие баланса работ: дополнительная работа, работа объемного расширения [1].

Модель канального подводящего устройства учитывает потери на трение через коэффициенты местного сопротивления  $\zeta_{\text{вх}}$  – внезапное сужение и  $\zeta_{\text{с}}$  – коэффициент потерь в сопле, причем как видно из следующих выражений:

$$\frac{P_0}{p_0} = \frac{P_0^*}{p_0^*} - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{C_0^2}{2} - \zeta_{\text{вх}} \frac{C_0^2}{2} \cdot \frac{k-1}{k};$$

$$\frac{P_1}{p_1} = \frac{P_0}{p_0} + \left( \frac{C_0^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} \right) \frac{k-1}{k} - \zeta_{\text{с}} \frac{C_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{k} = \frac{P_0}{p_0} + \left( \frac{C_0^2}{2} - (1 + \zeta_{\text{с}}) \frac{C_1^2}{2} \right) \cdot \frac{k-1}{k};$$

член, учитывающий потери в уравнениях механической энергии снижает статическое давление, а в уравнениях энергии в термодинамических параметрах:

$$C_p T_0 = i_{\text{вх}}^* - \frac{C_0^2}{2} + \zeta_{\text{вх}} \frac{C_0^2}{2};$$

$$C_p T_1 = i_1 + \frac{C_0^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} + \zeta_{\text{вх}} \frac{C_1^2}{2} - (1 - \zeta_{\text{с}}) \frac{C_1^2}{2};$$

увеличивает на величину потерь. Интегральный подход с коэффициентами потерь относительно корректно моделирует потери по статическому давлению, но акт возврата тепловой работы трение реализован уравнением энергии, в термодинамических параметрах только один раз в сечении «0» для канального подводящего устройства и один раз в сечении для входа в рабочее колесо на радиусе  $R_1$  [2].

Ясно, что две итерации возврата тепла явно недостаточно, однако сложная геометрия и миллиметровые проходные сечения подвода не позволяют зондировать поля давлений и температуру экспериментальной меньшем шаге, кроме как в технически возможных случаях для сечения «0» и «1» в виде коэффициентов потерь на местное сопротивление  $\zeta_{\text{суж}}$  и  $\zeta_{\text{с}}$ .

Тем не менее, возможно расчетное алгоритмическое преодоление этих сложностей если воспользоваться приемом [3] введения эквивалентной длины прямого участка на котором потеря напора на длине равна (эквивалентна) потери напора на соответствующем местном сопротивлении. Эквивалентная длина может быть найдена из равенства потерь напора по длине, определяемой по формуле Дарси – Вейсбаха. [4]:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l_{\text{экв}}}{d_{r\text{экв}}} \cdot \frac{v^2}{2};$$

и местным сопротивлением, учитываемым формулой:

$$h_{mc} = \zeta_{m.n} \cdot \frac{v^2}{2},$$

тогда при  $h_{mp} = h_{mc}$ :

$$l_{\text{экв}} = (\zeta_{m.n} / \lambda) d_{r\text{экв}}.$$

Возможны два варианта оценки потерь на местное сопротивление в канальном подводящем устройстве:

Для коэффициента потерь по входной скорости  $C_{\text{вх}} = C_0$ .

$$\frac{k}{k-1} \left( \frac{P_0^*}{p_0} - \frac{P_1^*}{p_1} \right) = \zeta_{m.n.C_0} \frac{C_0^2}{2};$$

$$l_{\text{экв}} = (\zeta_{m.n} / \lambda) d_{r\text{экв}}.$$

$$\frac{k}{k-1} \left( \frac{P_0^*}{p_0} - \frac{P_1^*}{p_1} \right) = \zeta_{m.n.C_0} \frac{C_0^2}{2};$$

Что характерно для подводов и отводов турбомашин и гораздо легче определяется экспериментально, либо коэффициент потерь по выходной скорости, что характерно для гидравлики [5], сложнее экспериментально: определяется только  $C_{1R}$ :

$$C_{1R} = \frac{\dot{V}}{F_{np1}}$$

Коэффициент потерь на трение в выражении (8) рассчитывается по выражению для гидравлически гладких стен:

$$\lambda = 0,316R_e^{-0.25}$$

Система интегральных уравнений для итераций по возвращению теплоты трения в подводящем устройстве запишется аналогично (3; 5):

$$C_p T_{i+1} = i_{i+1} = i_i + \frac{C_i^2}{2} - \frac{C_{i+1}^2}{2} + \lambda \frac{\Delta i}{d_{2,3}} \cdot \frac{C_i^2}{2};$$

$$P_{i+1} \frac{1}{P_{i+1}} = RT,$$

где  $i=0$  – соответствует ;  $i = n$  – радиус  $R_1$ .

В целом алгоритм требует настройки по численным значениям коэффициентов потерь, определяемых экспериментально в области варьирования геометрических и режимных параметров, направляющих (сопловых) аппаратов микротурбин.

### Библиографические ссылки

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. Донсков А.В. Анализ современных методов оценки и моделирования рисков возникновения нештатных ситуаций на борту космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 163-169.
3. Колбасин И. В. Основные источники и состав излучений, воздействующих на собственную внешнюю атмосферу космического аппарата с ядерной энергетической установкой// Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 123-130.
4. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: Учебник для вузов по специальности «Гидравлические машины и средства автоматизации», – М: Машиностроение, 1978. – 463 с., ил.
5. 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. Rankin's organic cycle in an autonomous thermal power system : 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. Donskov A.V. Analysis of modern methods for assessing and modeling the risks of emergency situations on board the spacecraft [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. 2018. Vol. 25. No. 4. pp. 163-169.
3. Kolbasin I. V..The main sources and composition of radiation affecting the own external atmosphere of a spacecraft with a nuclear power plant [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. 2020. Vol. 27. No. 2. pp. 123-130.
4. Yemtsev B.T. Technical hydromechanics: Textbook for universities in the specialty [Hydraulic machines and automation tools]. M : Mechanical Engineering, 1978. – 463 p., ill.
5. 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-2021-2-96-10.

УДК 629.785

## ТЕПЛООБМЕН ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

О. В. Шилкин<sup>1</sup>, А. А. Кишкин<sup>2</sup>

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

Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожный, Красноярский край, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: spsp99@mail.ru

*В данной работе рассматривается вопрос проектирование теплообменных поверхностей в составе системы терморегулирования космического аппарата.*

*Необходимость данного исследования обусловлена тем, что располагаемые на космических аппаратах (КА) конденсаторные и испарительные устройства осуществляют паросиловой цикл на органическом рабочем теле в условиях микрогравитации, что существенно искажает физико-механические условия для парожидкостной среды.*

*Ключевые слова: система терморегулирования, радиационные панели, тепловой режим, тепловое излучение, парожидкостная среда, преобразование энергии, микрогравитация.*

## HEAT TRANSFER OF A TWO-PHASE FLOW IN THERMAL CONTROL SYSTEMS OF SPACE VEHICLES

O. V. Shilkin<sup>1</sup>, A. A. Kishkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin St., 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

*In this paper, the issue of designing heat exchange surfaces as part of the spacecraft thermal control system is considered. The necessity of this study is due to the fact that condenser and evaporation devices located on spacecraft (spacecraft) carry out a steam-power cycle on an organic working body in microgravity conditions, which significantly distorts the physico-mechanical conditions for a vapor-liquid medium.*

*Keywords: temperature control system, radiation panels, thermal regime, thermal radiation, vapor-liquid medium, energy conversion, microgravity.*

К современным космическим аппаратам предъявляют повышенные требования по обеспечению сроков активного существования (САС). В зависимости от типа КА и его целевого назначения САС могут достигать 15 и более лет. Одним из перспективных направлений обеспечения повышенных САС является детальная проработка вопросов баланса и преобразования энергии на борту космического аппарата для обеспечения оптимального расходования энергетических ресурсов.

Действующие в настоящее время подходы к вопросу проектирования КА предполагают разграничение систем терморегулирования и энергоснабжения, что приводит к значительным потерям энергии с борта космического аппарата путем теплового излучения с радиационных панелей. Между тем, взаимная увязка двух этих систем с возможностью регенерации части сбрасываемой тепловой энергии позволит оптимизировать схему расходования энергетических ресурсов и повысить САС КА.

Система терморегулирования космического аппарата (СТР КА) предназначена для поддержания в требуемых диапазонах рабочих температур для всего установленного оборудования, на участке выведения и орбитальном функционировании, а также для обеспечения теплового режима оборудования КА совместно с технологическими средствами термостатирования.

В работе [1] утверждается, что уменьшение сил гравитации приводит к значительному изменению режимов течения двухфазных потоков. При испытаниях в условиях свободного падения при малых тепловых потоках наблюдался рост пузырьков, которые, однако, не отрывались от нагретой поверхности (ленты). При больших тепловых потоках вокруг всей ленты образовывался паровой пузырь. Из этого можно сделать вывод, что, по существу, пузырьковое кипение в условиях невесомости ( $g = 0$ ) не существует.

Изменение гравитации в широких пределах не оказывает существенного влияния на интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении в неподвижной жидкости [1]. Но сама область пузырькового кипения при ослаблении гравитации сужается вплоть до полного вырождения при  $g / g_0 = 0$ , то есть при нулевой гравитации (невесомости) начало кипения может сразу же приводить к кризису теплообмена (пленочному кипению).

Однако вероятность полного отсутствия ускорения космического летательного аппарата мала, если не исключена совершенно [2]. На аппарат всегда действуют (кроме сил гравитации) внешние и внутренние силы.

Из внешних сил наиболее значительными могут быть силы вызванные:

- 1) притяжением Луны, Солнца и планет;
- 2) торможением, обусловленным аэродинамическим сопротивлением;
- 3) торможением, обусловленным электрическим сопротивлением при солнечных вспышках и при прохождении радиационных поясов Земли;
- 4) ускорением в результате взаимодействия электростатического заряда летательного аппарата с геомагнитным полем;
- 5) ускорением под действием солнечного светового давления.

Ускорения возникают не только в результате возмущающего воздействия внешних сил на отдельные элементы летательного аппарата, но и в результате вращательного движения аппарата вокруг его центра тяжести. Кроме того, ускорения возникают из-за градиента гравитации в элементах летательного аппарата.

Результаты сравнительной оценки ускорений, возникающих под действием тех или иных внешних и внутренних сил приведены в таблице [2].

#### Ускорения в космосе

Причина	Высота круговой орбиты, км.	
	240	1610
Аэродинамического происхождения (максимум солнечной активности)	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-12}$
Геомагнетизм	$9,5 \cdot 10^{-12}$	$5,1 \cdot 10^{-13}$
Световое давление	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$
Внутренняя гравитация	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$
Управление ориентацией в полете	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Гравитационный потенциал	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$

*Примечание.* Ускорения даны относительно ускорения силы тяжести  $g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2$ .

Наиболее вероятно, что для условий невесомости характерны чрезвычайно малые ускорения, имеющие величину порядка  $10^{-6}$  и менее.

В свободно падающей системе небольшое сопротивление, подняв ускорение приблизительно до  $0,09 g_0$ , в этих условиях пузырьковое кипение продолжалось и во время падения [1]. Это показывает, что для поддержания пузырькового кипения достаточно небольшого ускорения силы тяжести [3].

Шероховатая внутренняя поверхность увеличивает конденсацию в основном в результате турбулизации пленки и развития поверхности, за счет придания волнистости поверхности.

Программа оптимизации теплоотдачи в условиях микрогравитации требует дополнительных исследований [4].

### Библиографические ссылки

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. Крушенко Г. Г., Голованова В. В. Совершенствование системы терморегулирования космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. № 3 (55). С. 185–189.
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
4. Жаренов И. С. , Жумаев З. С. Система обеспечения теплового режима микроспутника «Таблет-Сат-Аврора»: проектирование и лётная отработка // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 63-75.

### 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. Krushenko G. G., Golovanova V. V. *Improving the thermal control system of spacecraft* [Bulletin of SibGAU]. 2014. No. 3 (55). pp. 185-189.
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
4. Zharenov I. S. , Zhumaev Z. S. *The system for ensuring the thermal regime of the TabletSat-Aurora microsatellite: design and flight testing*. [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. 2015. Vol. 22. No. 3. pp. 63-75.

© Шилкин О. В., Кишкин А. А., 2022

УДК 620.179

## ДИСТАНЦИОННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ ПУЧКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

О. В. Щербина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: olg\_307@mail.ru

*Рассматривается радиационно-акустический контроль легкосплавных немагнитных материалов, его параметры и особенности.*

*Ключевые слова: радиационно-акустический контроль, электромагнитно-акустические преобразователи, неразрушающий контроль.*

## REMOTE RECORDING OF ULTRASONIC SIGNALS GENERATED BY PULSED BEAMS OF CHARGED PARTICLES

O. V. Shcherbina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: olg\_307@mail.ru

*The radiation-acoustic control of light-alloy non-magnetic materials, its parameters and features are considered.*

*Ключевые слова: radiation-acoustic control, electromagnetic-acoustic transducers, non-destructive testing.*

У большинства приборов УЗ дефектоскопии акустический контакт между преобразователем и контролируемым изделием осуществляется с помощью контактных жидкостей, что ограничивает возможности УЗ метода в авиа и ракетостроении. В связи с этим весьма актуальны исследования, посвященные разработке бесконтактных методов генерации и приема акустических колебаний [1].

Впервые на возможность использования для неразрушающего контроля (НК) акустического эффекта импульсных пучков заряженных частиц, взаимодействующих с твердым телом, указано в работах [2]. В работах [3, 4] проведен теоретический анализ механизма генерации УЗ колебаний импульсными пучками заряженных частиц, позволивший восстановить пространственно-временную структуру возбуждаемого таким образом акустического излучения.

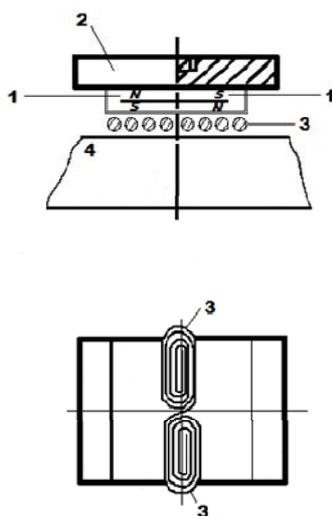
Необходимо отметить, что радиационный метод позволяет одновременно возбуждать, как минимум, два типа акустических волн – продольные и сдвиговые. Причем независимо от параметров исходного воздействия и геометрии зоны возбуждения, первичной является продольная акустическая волна, а генерация поперечной волны – результат трансформации продольной волны при ее падении на поверхность ввода энергии.

Существенный недостаток радиационного метода генерации ультразвуковых колебаний – его необратимость. Этот недостаток может быть эффективно компенсирован путем использования бесконтактных способов регистрации генерируемых сигналов. Как показывает теоретический анализ и экспериментальные исследования, наиболее оптимальный тип бесконтактных детекторов акустического излучения – ЭМА преобразователи (ЭМАП).

Применение ЭМАП в качестве бесконтактных приемников УЗ сигналов основано на использовании обратного ЭМА эффекта, состоящего в возбуждении вихревых токов в металле, частицы которого под действием акустических волн колеблются в постоянном магнитном поле. Эти вихревые токи

индуцируют переменный ток в высокочастотной катушке, которая и является приемником [5]. Эффективность такой регистрации УЗ колебаний в значительной степени зависит как от конструкции и геометрических размеров приемной катушки, так и от величины и характера, распределения индукции – магнитного поля. Для создания наиболее оптимальных бесконтактных детекторов УЗ колебаний проведены экспериментальные исследования. В результате разработаны малогабаритные высокоэффективные ЭМАП, позволяющие регистрировать как продольные, так и сдвиговые акустические волны, а кроме того, осуществлять их одновременный прием. Магнитные системы этих ЭМАП выполнялись из редкоземельных металлов (РЗМ) на основе интерметаллических соединений кобальта, обладающих высокой коэрцитивной силой и большой магнитной энергией, а также резко выраженной пространственной неоднородностью магнитного поля. Прием сдвиговых колебаний наиболее эффективно осуществляется ЭМАП, магнитная система которого состоит из двух плотно состыкованных друг с другом призматических постоянных магнитов, установленных равноименными полюсами на ферромагнитной пластине, выполняющей одновременно роль магнитопровода. Плоская эллиптическая приемная катушка закрепляется на противоположных полюсах магнитов таким образом, чтобы большая ось катушки совпадала с линией стыковки магнитов. Регистрацию продольных акустических волн достаточно эффективно позволяют выполнять ЭМАП с магнитной системой из одного призматического магнита, а высокочастотная катушка также вытянутой формы при этом располагается под полюсом магнита симметрично его оси. ЭМАП такой конструкции может принимать и сдвиговые колебания, однако коэффициент для них в 3–5 раз меньше.

Для повышения помехоустойчивости ЭМАП путем компенсации импульса помехи, индуцируемого в катушке преобразователя пучком заряженных частиц как при инжекции пучка, так и при сбросе его на мишень, предложена конструкция ЭМАП (см. рисунок), состоящая из двух идентичных плоских катушек индуктивности, размещенных последовательно вдоль линии стыковки магнитов, укрепленных на ферромагнитной пластине.



- 1 – постоянный магнит;
- 2 – ферромагнитная пластина;
- 3 – катушка индуктивности;
- 4 – контролируемый объект.

Дифференциальный ЭМАП

Катушки подключены встречно, что обеспечивает компенсацию ЭДС помехи, вызванной влиянием импульсного пучка заряженных частиц. Кроме того, такое включение катушек позволяет достичь максимальной чувствительности по отношению к достаточно малым дефектам, поскольку наличие дефекта в зоне расположения катушек приводит к возникновению на входе преобразователя отличной от нуля ЭДС, по величине которой судят о размерах дефекта.

Дифференциальное включение индукторов ЭМАП позволяет уменьшить влияние нестабильности чисел электронов в импульсе и стабилизировать коэффициент преобразования независимо от изменения термофизических свойств материала контролируемого изделия. Разностный сигнал, поступающий с детектора при нарушении симметрии акустического тракта дефектоскопа, вызванный появлением дефектной области в зоне приема одного из индукторов ЭМАП, имеет амплитуду намного меньшую чем амплитуда данного эхо сигнала. И хотя при этом отношение сигнал/шум на выходе преобразователя повышается, а чувствительность к малым дефектам значительно увеличивается, по-

мехи, возникающие в линиях связи и электронном тракте дефектоскопа, не позволяют в полной мере использовать преимущества такого способа включения обмоток ЭМА детектора.

Дифференциальное включение наиболее эффективно при вычитании сигналов с индукторов после предварительного усиления, либо на выходе кабельной линии связи.

### **Библиографические ссылки**

1. Буденков Р.А., Гуревич С.Ю. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) // Дефектоскопия. 1981 г., 5 стр.
2. Симанчук В.И., Янисов В.В. Генерация акустических волн для целей неразрушающего контроля импульсными потоками электронов//Дефектоскопия. 1979 г., 105 стр.
3. Калиниченко А.И., Лазурик-Зльцурин В.Т. Термоакустический эффект пучков быстрых частиц в твердом теле // ВИНТИ. Дефектоскопия. 1974 г., 21 стр.
4. Симанчук В.И., Янисов В.В. О форме акустического сигнала, возбуждаемого в металлах электронными потоками больших плотностей // Дефектоскопия. 1980 г. 31 стр.
5. Алешин Н.П., Белых В.Е., Вopilкин А.Х. Методы акустического контроля металлов // Машиностроение. 1989 г. 465 стр.

### **References**

1. Budenkov R.A., Gurevich S.Ju. Sovremennoe sostojanie beskontaktnyh metodov i sredstv ul'trazvukovogo kontrolja (obzor) // Defektoskopija. 1981 g., 5 str.
2. Simanchuk V.I., Janisov V.V. Generacija akusticheskikh voln dlja celej nerazrushajushhego kontrolja impul'snymi potokami jelektronov//Defektoskopija. 1979 g., 105 str.
3. Kalinichenko A.I., Lazurik-Zl'curin V.T. Termoakusticheskij jeffekt puchkov bystryh chastic v tverdom tele // VINITI. Defektoskopija. 1974 g., 21 str.
4. Simanchuk V.I., Janisov V.V. O forme akusticheskogo signala, vzbuzhdaemogo v metallah jelektronnymi potokami bol'shih plotnostej // Defektoskopija. 1980 g. 31 str.
5. Aleshin N.P., Belyh V.E., Vopilkin A.H. Metody akusticheskogo kontrolja metallov // Mashinostroenie. 1989 g. 465 str.

© Щербина О. В., 2022



**Секция**

**«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»**

УДК 629.78.015

## СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ЦАНГА ИЗ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ

А. С. Вехов, Т. Л. Некрасова, С. А. Титаренко

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

*Отработана технология изготовления цанг из бериллиевой бронзы с отработкой режимов термообработки и последовательной механической обработки.*

*Ключевые слова: способ, механическая обработка, термическая обработка.*

## METHOD OF MECHANICAL PROCESSING JF CARBON FIBER PIPES

A. S. Vehov, T. L. Nekrasova, S. A. Titarenko

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: vas@iss-reshetnev.ru, ntl@iss-reshetnev.ru, tca@iss-reshetnev.ru

*The technology for manufacturing collets from beryllium bronze with the development of heat treatment modes and sequential machining has been developed.*

*Keywords: method, mechanical processing, heat treatment.*

К приборам современных космических аппаратов предъявляются высокие требования по радиотехническим характеристикам (РТХ). В связи с чем возросли требования к коаксиально-волноводным переходам и как следствие ужесточению требований к точностным характеристикам входящих деталей, таких как высокоточные мелкоразмерные детали типа цанга, различных контактов и разъёмов, изготовленных из бериллиевой бронзы БрБ2, обладающей пружинными свойствами. Данные требования диктуют необходимость модернизации и усовершенствования методов технической обработки.

Коаксиально-волноводный переход – это устройство, предназначенное для ввода/вывода СВЧ-сигналов, к примеру, в разветвителях волноводного типа. Тип соединителя зависит от рабочего диапазона частот, требований заказчика к интерфейсу и конструкции прибора, в котором этот соединитель будет применяться. Реализация конструкции соединителя определённого типа зависит от требований к электрическим параметрам, их стабильности и воспроизводимости.

Высокоточные пружинные мелкоразмерные детали типа цанга находят широкое применение в трактах СВЧ. Пример такой цанги указан на рис. 1. Отдельные узлы разборных трактов оснащают специальными разъёмами, которые должны обеспечивать надёжный электрический контакт в местах соединения проводников. В высокочастотных соединителях контакт обеспечивают с помощью высокоточных пружинных мелкоразмерных деталей типа цанга и штекеров (см. рис. 1), удерживаемых в соединении с помощью внешних резьбовых соединений или иных фиксирующих приспособлений [1-2].

Наиболее подходящим материалом для изготовления высокоточных пружинных мелкоразмерных деталей типа цанга в трактах СВЧ, обладающим пружинными свойствами, является сплав меди с бериллием – бериллиевая бронза.

На сегодняшний день для АО «ИСС» поставщиком отечественных прутков из бериллиевой бронзы БрБ2 является ОАО «КУЗОЦМ», г. Каменск Уральск. Прутки из бериллиевой бронзы БрБ2 поставляются с сертификатом качества и соответствуют требованиям ГОСТ 15835.

В 2013 году завод – изготовитель изменил технологию изготовления прутков из сплава БрБ2. При консультации с технологами – прокатчиками выяснилось, что прутки диаметром 5-12 мм из сплава БрБ2 изготавливаются прессованием с последующей смоткой и закалкой в бухтах. В дальнейшем по-

лучают мерные прутки БрБ2М с размоткой бухты на правильной машине с волочением через фильеру. При этом в прутках БрБ2 сохраняются остаточные радиальные напряжения, что усложняет процесс достижения требуемых точностных характеристик деталей типа цанга и увеличивает цикл их изготовления (см. рис. 2). В процессе изготовления деталей типа цанга и придания им пружинных свойств с помощью термообработки наблюдаются значительные поводки: скручивание детали вдоль оси, отклонение от заданного профиля. При этом ранее на изготавливаемых высокоточных пружинных мелкоразмерных деталях типа цанга проблем такого характера выявлено не было, а технология изготовления была полностью отработана и внедрена.

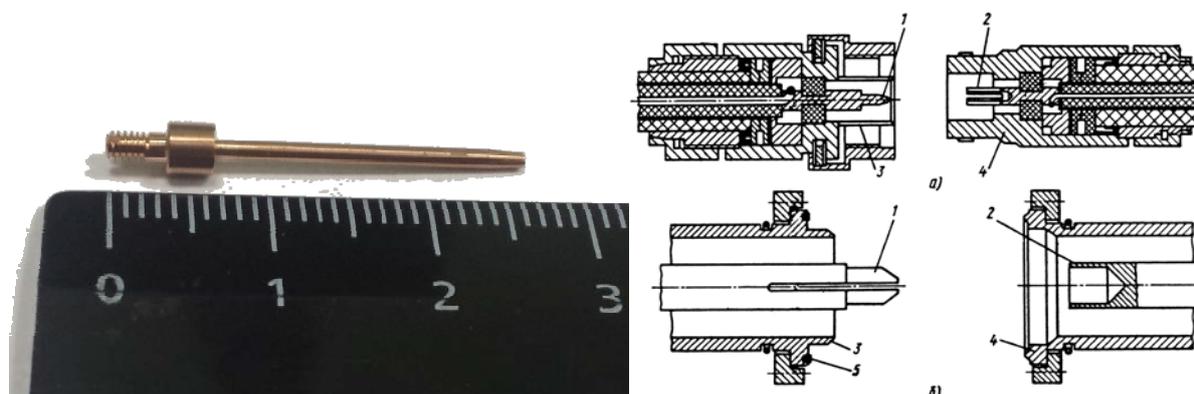


Рис. 1. Пример цанги для СВЧ-тракта и типы высокочастотных коаксиальных соединителей:  
1 – штыревой контакт; 2 – гнездовой контакт; 3 – штыревая втулка; 4 – гнездовая втулка;  
5 – прокладка герметизации



Рис. 2. Скручивание волокон прутка ДКРНТ БрБ2 ГОСТ15835-70 Ø8

После ряда проведенных работ, было принято решение провести комплексную отработку технологии изготовления высокоточных пружинных мелкоразмерных деталей типа цанга, включающую в себя: изменение свойств поставляемой заготовки, изменение конструкции фиксирующего приспособления и изменение технологического процесса механической обработки.

Одним из основных направлений в решении поставленной технической задачи было исключение скрученности волокон в прутке путем получения заготовки методом ковки. Для этого поковка изготавливалась методом свободной ковки и проходила закалку до температуры плюс  $790 \pm 10$  °C с выдержкой в течение 15 минут и последующим охлаждением в воде.

Для достижения технологической твердости поковок, требуемой для проведения дальнейшей механической обработки, выполнялось старение поковок при температуре плюс  $250 \pm 10$  °C с выдержкой 30 минут и охлаждением на воздухе до температуры помещения.

Так же для достижения требуемых точностных характеристик деталей типа цанга был изменен технологический процесс. Наилучшим вариантом был выбран метод чередования механической обработки и стабилизирующего старения (термообработки), позволяющий снять возможные остаточные напряжения. Технология состояла из 2 циклов. Первый состоял в предварительной механической обработки выполнялась термическая обработка заготовки при температуре плюс 110 °C с выдержкой 1 час на воздухе (в свободном состоянии). На следующем цикле в цангах выполнялась механическая обработка «лепестков» и дисперсионное старение для получения пружинных свойств. Дисперсионное старение проводили в вакуумной печи с остаточным давлением  $1 \times 10^{-1} \dots 1 \times 10^{-2}$  мм рт.ст. и прогревом деталей до температуры плюс  $310 \pm 10$  °C в течение 90-100 минут с выдержкой на воздухе в течение

120–150 минут и последующим охлаждением в печи до температуры плюс 150–200 °С. После выполнения дисперсионного старения детали выгружали из печи и охлаждали на воздухе. Дисперсионное старение деталей типа цанга выполняли в специально изготовленном фиксирующем приспособлении (см. рис. 3).



Рис. 3. Фиксирующее приспособление для дисперсионного старения высокоточных пружинных мелкогабаритных деталей типа цанг

Окончательную механическую обработку высокоточных мелкогабаритных деталей типа цанга из бериллиевой бронзы БрБ2 проводили уже после получения ими пружинных свойств в зоне «лепестков» [3-4].

Изготовление высокоточных мелкогабаритных деталей типа цанга из поковки БрБ2 по представленной технологии, в которой проводилась окончательная механическая обработка в зоне «лепестков» уже после термообработки для после получения пружинных свойств (с применением специального приспособления для термической обработки) получила на выходе 10 0% готовую продукцию. Данная технология прошла патентный анализ [5].

#### Библиографические ссылки

1. Технология производства космических аппаратов: учебник для вузов/ Н.А Тестоедов [и др.]. Сиб. Гос. Аэрокосмич. Ун-т.- Красноярск, 2009.-352, [4] л. цв. ил.
2. Гущин В.Н. Основы устройства космического аппаратов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272с.:ил.
3. Верейна Л.И. Технология фрезерной обработки: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2017. 272с.:ил.
4. Кувшинский В.В. Фрезерование: учебник для вузов. -М.: Машиностроение, 2003.-283с.:ил.
5. Пат. 2764726 Российская Федерация, <sup>ПМК</sup> С22F1/08 Способ изготовления деталей типа цанга из бериллиевой бронзы Амосова Татьяна Алексеевна, Андреева Наталья Александровна, Вехов Александр Семенович, Михнев Михаил Михайлович; №2021102867; заявл. 08.02.2021; опубл. 19.01.2022, Бюл. № 2.

#### References

1. Spacecrafts manufacturing technique: university textbook / N. A. Testoyedov [etc.].Siberian State Aerospace University-Krasnoyarsk, 2009.-352p., [4], colored illustrations.
2. Gushin V.N. Basic concepts of spacecrafts configuration: university textbook. M.:Mashinostroyeniye, 2003.-272p.:colored illustrations
3. Vereina L. I. Milling processing technology: textbook for universities. M.: Mechanical Engineering, 2017. -272 p.: colored illustrations.
4. Kuvshinsky V. V. Milling: textbook for universities. M.: Mechanical Engineering, 2003. 283 p.: ill.
5. Pat. 2736505 Russian Federation, PMK C22F1/08 Method for producing collet type parts from beryllium bronze Amosova Tatiana Alekseevna, Andreeva Natalia Aleksandrovna, Vekhov Alexander Semenovich, Mikhnev Mikhail Mikhailovich; No. 2021102867; application 08.02.2021; publ. 19.01.2022, Bul. No. 2.

УДК 620.22

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАНОПОРИСТЫХ ПЛЕНОК

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 практического применения пленок с порами наноразмеров в ракетно-космической отрасли. Благодаря своему структурному строению они находят широкое применение в различных современных технологиях и весьма перспективны для использования, как в аэрокосмической, так и в следующих отраслях: химической, медицинской, нефтеперерабатывающей, биологической и др.*

*Ключевые слова: нанопористые пленки, нанопористые материалы, композиционные наноматериалы, пористые оксидные пленки, наноматериалы.*

## PRACTICAL APPLICATIONS OF NANOPOROUS FILMS

A. V. Vlasenko, A. I. Kosyрева

JSC «Krasnoyarsk Machine Building Plant»  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru

*In this paper, we consider the possibility of practical application of films with nanosized pores in the rocket and space industry. Due to their structural structure, they are widely used in various modern technologies and are very promising for use, not only in aerospace, but also in the following industries: chemical, medical, oil refining, biological, etc.*

*Keywords: nanoporous films, nanoporous materials, composite nanomaterials, porous oxide films, nanomaterials.*

Разработка технологии производства нанопористых пленок относится к перспективнейшим направлениям, так как такие пленки представляют практическую ценность по причине уникального комплекса свойств, которыми они обладают, особенно актуальными для ракетостроения, ядерной физики, нанотехнологий, микробиологии, материаловедения, оптики, микроэлектроники и фотовольтаники, медицинской, химической, биохимических промышленности, а также в области защиты окружающей среды. Одни из важнейших этих свойств: высокие механическая прочность, термическая и химическая стойкость; а для некоторых из пленок – малый размер пор и их упорядоченное расположение.

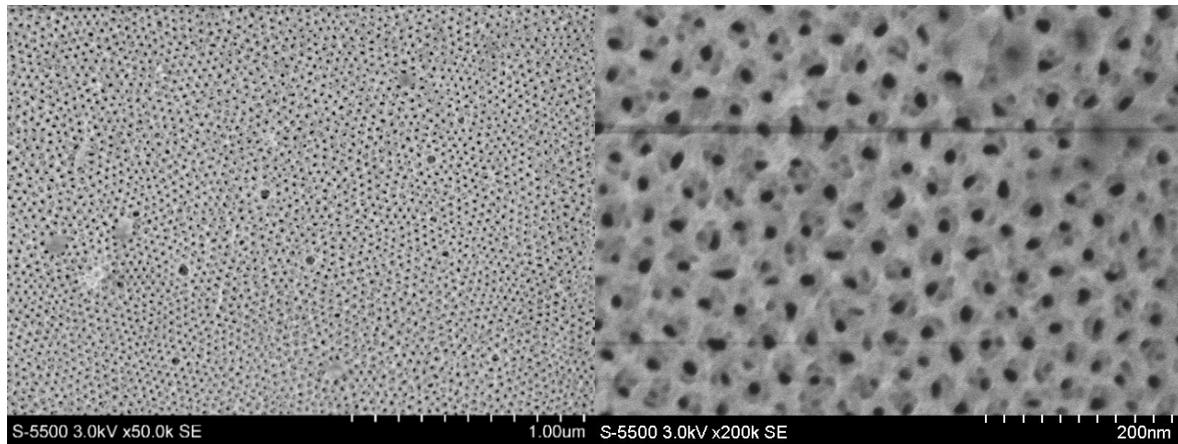
Благодаря своей микроструктуре, существенно отличающейся от структуры сплошного объемного материала, в них наблюдаются значительные изменения физических и химических характеристик, таких как, электропроводность, химическая активность, термодинамические и каталитические параметры.

Морфология нанопористых пленок с химическим составом аналогичным объемному материалу позволяет в значительной степени отличаться от него характеристиками. Дефекты строения в массивных материалах, не оказывающие существенного влияния на их особенности, в нанопористых пленках имеют важнейшее значение.

Так, например, шероховатость поверхности практически не влияет на свойства сплошных материалов, в то время как для нанопористых пленок она может являться фактором, определяющим многие параметры. По этой причине их исследование раскрывает возможности открытия нетрадицион-

ных, необычных явлений и закономерностей, эффектов, отсутствующих у массивных материалов, которые могут стать основой создания принципиально новых технологий и устройств.

Нанопористыми пленкам называются пленки с диаметром пор в диапазоне значений  $10^{-9} \div 10^{-8}$  м. Микрофотографии, выступающей в качестве примера, нанопористой пленки оксида алюминия при 50 000-кратном и 200 000-кратном увеличении представлены на рисунке.



Микрофотографии нанопористой пленки оксида алюминия при 50 000-кратном (слева) и 200 000-кратном (справа) увеличении [1]

Тенденция развития современной ракетно-космической техники предполагает использование новых материалов, чтобы обеспечить все более лучшие удельные и абсолютные характеристики (уменьшение массы конструкции с одновременным увеличением массы полезного груза при обеспечении заявленных требований по прочности и надежности изделия, химическая и термическая стойкость, и др.). Для выполнения данных требований могут использоваться композиционные материалы, матрицами для получения наноструктур которых являются нанопористые пленки. Кроме того, с их применением можно получить наночастицы и нановолокна, использующиеся в качестве армирующих элементов (наполнителя) композиционных материалов

Перспективным направлением современных технологий считается получение композиционных материалов, в которых нанокристаллы различных веществ упорядоченно расположены в нанопористой матрице, благодаря чему особенно интересны в интегральной микро- и наноэлектронике.

Формально нанопористые пленки можно рассматривать как композиционный материал даже в том случае, когда роль второй фазы играет воздух, располагающийся в порах. Однако в качестве наполнителя могут быть использованы и любые другие вещества.

Например, ученые университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ» вместе с белорусскими и немецкими коллегами синтезировали нанопористые пленки, состоящие из кристаллов титаната стронция, которые станут основой для композитов, позволяющих создать новые оптоэлектронные и сверхвысокочастотные устройства, а также элементы энергонезависимой памяти [2]. В будущем, помещая в поры титаната стронция диэлектрические или магнитные материалы возможно получить композиты с новыми, пока недостижимыми свойствами.

В настоящее время ведутся исследования как в области разработки технологий формирования и исследования свойств массивов нанокристаллов, встроенных в пористые матрицы, так и создания подходов к формированию на их основе электронных устройств [3].

Важной особенностью нанопористых пленок является их проницаемость для жидких и газообразных веществ. Из-за наноразмеров пор в пленках она может быть различна для молекул и частиц различных форм и размеров, в следствие чего нанопористые вещества могут применяться для адсорбции, фильтрации и разделению смесей, катализа.

Мембраны из нанопористых пленок обладают функцией разделения высокой частоты, выполняя молекулярно-ситовую фильтрацию. Они могут использоваться в качестве фильтров не только в ракетно-космической отрасли, но и в медицинской, химической, биохимических промышленности, фотонных кристаллах, а также в области защиты окружающей среды. Такие мембраны используют для механической очистки жидкостей и газов, избирательной фильтрации, разделения и обогащения

газов, насыщения газом (аэрации) жидкостей, порошкообразных веществ, в качестве пылеуловителей, опреснителей, увлажнителей, регенераторов смесей.

Основные характеристики нанопористых пленок, предназначенных для фильтрации, которые делают их особенно актуальными: малый размер пор, влияющий на степень тонкости фильтрации, высокие задерживающая способность и механическая прочность, а в агрессивных условиях работы – химическая и термическая стойкость.

Таким образом, возможность получения нанопористых пленок, электрофизические и оптические характеристики которых, могут изменяться в широких пределах, обуславливает их перспективу применения в качестве изоляционных материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, просветляющих и антиотражающих покрытий, световодов и интерференционных фильтров, активных слоев газочувствительных датчиков, датчиков влажности, буферных слоев для металлизации и эпитаксии структур, исходных материалов для получения наномембран и фильтров, нанокпозиционных материалов.

### Библиографические ссылки

1. Сахаров Ю. В. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: «Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом» [Электронный ресурс]. URL: [https://postgraduate.tusur.ru/system/file\\_copies/files/000/001/320/original/%D0%A1%D0%B0%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2\\_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf](https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/001/320/original/%D0%A1%D0%B0%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf)(дата обращения: 31.07.2022).
2. Год науки и технологий. Созданы наноструктурированные пленки для новых композитных материалов [Электронный ресурс]. URL:<https://xn--80afdrjqf7b.xn--p1ai/news/7881/>(дата обращения: 31.07.2022).
3. Рамбиди, Н. Г. Физические и химические основы нанотехнологий / Н. Г. Рамбиди, А. В. Березкин. М.: Физматлит, 2009. 456 с.

### References

1. Saharov YU. V. Dissertaciyanasoiskanieuchenostepeni doktora tekhnicheskikh nauk natemu: «Struktura i svoystva poristykh oksidnykh plenok, modifitsirovannyh uglerodom» [Saharov YU. V. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences on the topic: “Structure and properties of porous oxide films modified with carbon”] Available at: [https://postgraduate.tusur.ru/system/file\\_copies/files/000/001/320/original/%D0%A1%D0%B0%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2\\_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf](https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/001/320/original/%D0%A1%D0%B0%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf)(accessed 31.07.2022).
2. God nauki i tekhnologij. Sozdany nanostrukturirovannye plenki dlya novykh kompozitnykh materialov [Year of science and technology. Nanostructured films for new composite materials have been created]. Available at: <https://xn--80afdrjqf7b.xn--p1ai/news/7881/>(accessed 31.07.2022).
3. Rambidi, N.G. Fizicheskie i himicheskie osnovy nanotekhnologij/ N.G. Rambidi, A.V. Berezkin. M.: Fizmatlit, 2009. 456 s [Rambidi, N.G. Physical and chemical foundations of nanotechnologies / N.G. Rambidi, A.V. Berezkin. M.: Fizmatlit, 2009. 456 p.](In Russ.)

© Власенко А. В., Косырева А. И., 2022

УДК 52-08

## КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СФЕРИЧЕСКИХ ДСЕ С ПОМОЩЬЮ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

К. А. Вотяков<sup>1</sup>, М. Н. Надежин<sup>1</sup>, М. В. Карабонцева<sup>2</sup>, Н. В. Карабонцева<sup>2</sup>, Г. А. Мацур<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, Красноярск, просп. им. газеты «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: maxblack96@mail.ru

*В статье представлен метод использования КИМ для бесконтактного съема информации, позволяющий достичь высокой точности проведения контрольно-измерительных работ, а также значительно снизить затраты на измерения ДСЕ сферической формы.*

*Ключевые слова: координатно-измерительная машина (КИМ), метрология, сканирование, сферические детали.*

## CONTROL OF THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF SPHERICAL PARTS USING COORDINATE MEASURING MACHINES

K. A. Votyakov<sup>1</sup>, M. N. Nadezhin<sup>1</sup>, M. V. Karabonceva<sup>2</sup>, N. V. Karabonceva<sup>2</sup>, G. A. Matsur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC

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: maxblack96@mail.ru

*The article presents the method of using CMM for non-contact information retrieval, which makes it possible to achieve high accuracy in carrying out control and measurement, as well as significantly reduce the cost of measuring a spherical.*

*Keywords: coordinate measuring machine (CMM), metrology, scanning, spherical parts.*

До настоящего момента контроль геометрических характеристик сферических днищ производился с помощью универсального инструмента (штангенциркуля, линейки, штангенрейсмаса). В данный момент контроль толщины ДСЕ производится с помощью ультразвуковых толщиномеров, что тоже занимает много времени и сил.

На смену универсальному инструменту, пришли координатно-измерительные машины. Так на протяжении более пяти лет на предприятии АО «Красмаш» используют мобильные координатно-измерительные машины для контроля геометрических характеристик всех сферических днищ. Но контактным методом не всегда удается понять форму самой сферы и ее радиус от центра [1].

С помощью мобильной координатно-измерительной машины со сканером, был разработан метод сканирования сферических ДСЕ с внутренней и наружной сторон, чтобы производить контроль толщины и радиус сферы в любой точке.

Экспериментальным методом было установлено, что для выполнения данной задачи нужно использовать «реперные» точки [2].

### **Принцип действия метода:**

- В специальную оснастку устанавливается сферическое днище, так чтобы оно было в заневоленном состоянии.
- На днище в хаотичном порядке наклеиваются «реперные» точки (рис. 1).
- Сканируется днище.
- Собираются контактным методом все «реперные» точки.

- Делается смена позиций в программном обеспечении КИМ.
- Переворачивается ДСЕ.
- Собираются «реперные» точки в том же порядке.
- Сканируется днище с другой стороны (рис. 2).
- Производится анализ и обработка результатов (рис. 3) [3].

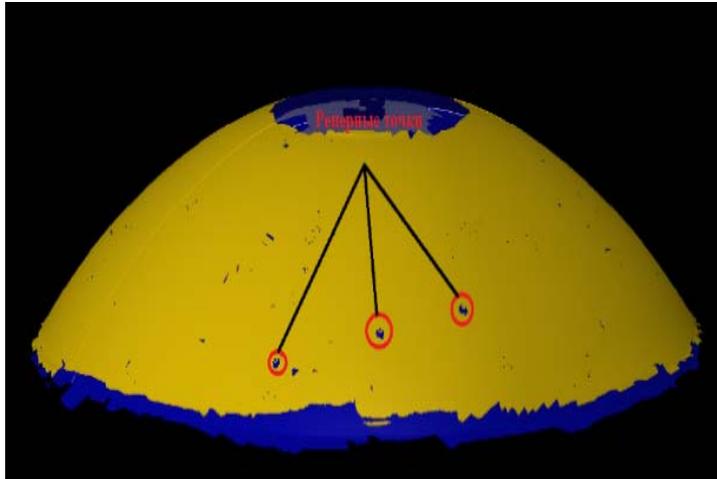


Рис. 1. «Реперные» точки

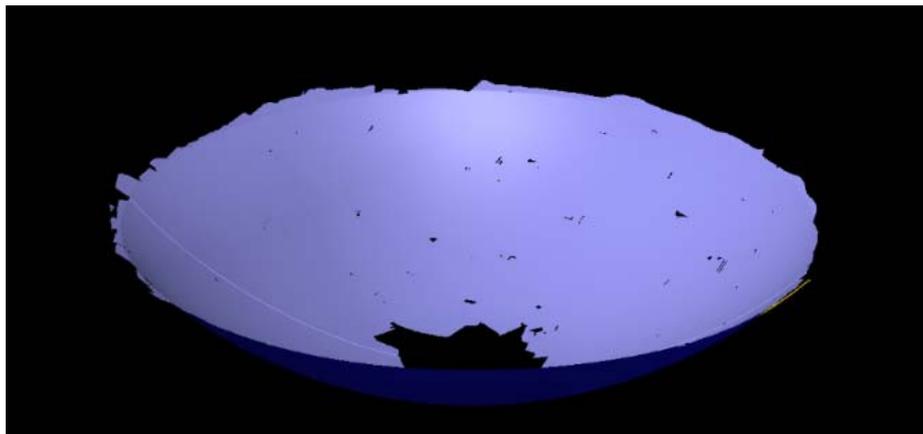


Рис. 2. Отсканированная деталь.

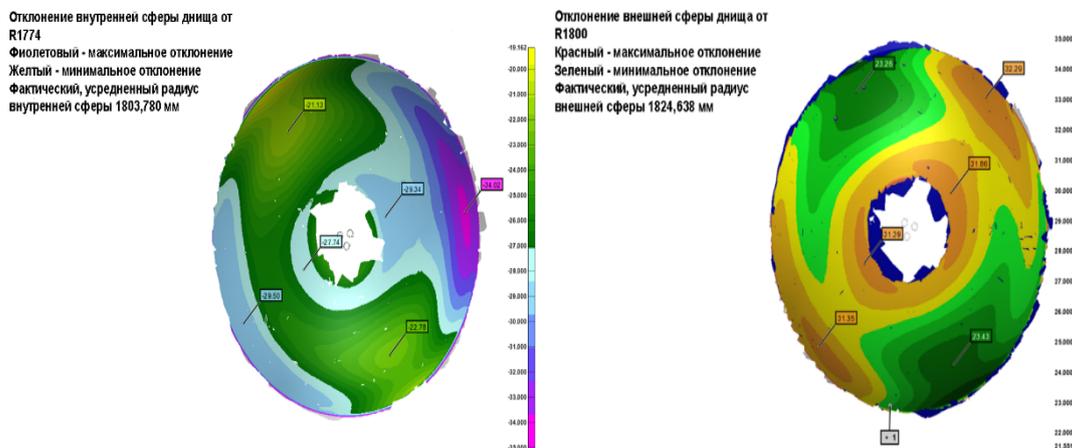


Рис. 3. Анализ результатов представленный в виде цветовой карты с выносками.

В данной работе приведены экспериментальные и практические процессы по определению толщины и радиуса днища. Подобная схема измерений обладает высокой гибкостью, позволяя однообразно определять параметры пространственно сложных поверхностей, такие как радиус кривизны, деформацию, а в нашем случае и толщину [4]. Решить задачу высокопроизводительных и точных измерений в цеховых условиях позволило применение лазерного трекера [5].

### Библиографические ссылки

1. Измерительные машины – Материалы выставки «Металлообработка 2018» в г. Москва.
2. Васильева А. А., Абляз Т. Р. Исследование процесса измерения корпусных деталей на координатно-измерительной машине // MASTER'S JOURNAL. 2015. № 1. С. 51-59.
3. Тигнибидин А. В., Зайнуллина Л. В., Ромашенко В. А. Определение достоверных методик проведения измерений на координатно-измерительных машинах // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. – № 1 (6). С. 171-191.
4. Современная координатно-измерительная техника в производстве изделий РКТ. Учебное пособие для студентов магистратуры направлений подготовки 15.04.05 Konstruktorsko-tehnologicheskoe obespechenie mashinostroitel'nyh proizvodstv, 24.04.01 Raketnye komplekсы i kosmonavtika, 24.04.02 Sistemy upravlenija dvizheniem i navigacija, 24.04.05 Dvigateli letatel'nyh apparatov, 27.04.01 Standartizacija i metrologija, ochnoj formu obuchenija.. СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева. Красноярск 2017. – 23 с.
5. Сурков И. В., Гузеев В. И., Схиртладзе А. Г. Автоматизированные методы и средства измерений, испытаний и контроля в машиностроении: учеб. пособие / ЮУрГУ. Челябинск, 2009. – 337 с.

### References

1. Measuring machines – Materials of the exhibition "Metalworking 2018" in Moscow.
2. Vasilyeva A.A., Ablyaz T.R. Study of the process of measuring body parts on a coordinate measuring machine // MASTER'S JOURNAL. 2015. No. 1. P. 51-59.
3. Tignibidin A.V., Zainullina L.V., Romashchenko V.A. Measurement of measurement methods on coordinate measuring machines // Dynamics of systems, locks and machines. 2018. No. 1 (6). p. 171-191.
4. Modern coordinate measuring technology in the production of rocket and spacecraft products. Study guide for master's students of preparation preparation 04.15.05 Design and technological support of machine-building industries, 04.24.01 Rocket complexes and astronautics, 04.24.02 Motion control systems and navigation, 04.24.05 Aircraft engines, 04.27.01 Standardization and metrology, full-time learning. SibGU named after Academician M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk 2017
5. Surkov I.V., Guzeyev V.I., Skhirtladze A.G. Avtomatizirovannyye metody i sredstva izmereniy, ispytaniy i kontrolya v mashinostroyenii: ucheb. posobiye / YUUrGU. Chelyabinsk, 2009. – 337 p.

© Надежин М. Н., Вотяков К. А., Карабонцева М. В., Карабонцева Н. В., Мацур Г. А., 2022

УДК 621.785.532

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
И ИЗДЕЛИЙ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ  
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОЙ ИНЖЕНЕРИИ\***

В. В. Денисов\*, Ю. А. Денисова, Н. Н. Коваль, С. С. Ковальский, А. А. Леонов, Д. Ю. Игнатов,  
Е. В. Островерхов, А. Д. Тересов, В. Н. Тищенко, М. В. Савчук, В. В. Яковлев

Институт сильноточной электроники СО РАН  
Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3  
E-mail: denisov@opee.hcei.tsc.ru

*Представлены методы и оборудование для реализации процессов упрочнения поверхности конструкционных и инструментальных материалов методами ионно-плазменного азотирования, плазменно-ассистированного электродугового напыления и комбинации этих методов. Описаны принципы генерации газовой и газо-металлической плазмы в разрядах низкого давления и оборудование на их основе. Описываемые методы используются для решения задач упрочнения поверхности инструментальных и конструкционных материалов, в частности деталей мелко модульных зубчатых передач ответственных узлов космических аппаратов.*

*Ключевые слова: упрочнение поверхности, конструкционные материалы, ионно-плазменное азотирование, покрытие, напыление*

**INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE SURFACE OF MATERIALS  
AND PRODUCTS BY COMBINED METHODS OF BEAM-PLASMA ENGINEERING**

V. V. Denisov\*, Yu. A. Denisova, N. N. Koval, S. S. Kovalsky, A. A. Leonov, D. Yu. Ignatov,  
E. V. Ostroverkhov, A. D. Teresov, V. N. Tishchenko, M. V. Savchuk, V. V. Yakovlev

Institute of High Current Electronics SB RAS  
2/3, Akademicheskiiy prospect, Tomsk, 634055, Russian Federation  
E-mail: denisov@opee.hcei.tsc.ru

*Methods and equipment for the implementation of the processes of hardening the surface of structural and tool materials by ion-plasma nitriding, plasma-assisted arc deposition and a combination of these methods are presented. The principles of generation of gaseous and gas-metal plasmas in low-pressure discharges and equipment based on them are described. The described methods are used to solve the problems of hardening the surface of tool and structural materials, in particular, parts of fine-grain gears of critical components of spacecraft.*

*Keywords: surface hardening, structural materials, ion-plasma nitriding, coating, sputtering*

**Введение.** Увеличение длительности активного существования космических аппаратов (здесь и далее КА) с 5–7 до 15 лет является актуальной задачей. Это возможно в случае повышения срока эксплуатации деталей ответственных узлов КА. В подавляющем большинстве случаев эксплуатационные характеристики изделий зависят от свойств поверхности. Одними из наиболее эффективных и экологичных способов упрочнения поверхности металлических изделий являются электронно-ионно-плазменные методы модификации, включающие методы ионно-плазменного диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов различными элементами (азотирование, цементация и др.), плазменно-ассистированное напыление функциональных покрытий и другие. Перспективным является использование методов генерации газоразрядной плазмы при низком давлении, при кото-

\* Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

ром, возможно независимое управление всеми основными параметрами рабочего процесса (рабочее давление, ток разряда, напряжение горения разряда, температура и параметры воздействия на подложку и др.). Многообещающим является формирование однородной низкотемпературной газоразрядной плазмы в больших вакуумных объемах при использовании несамостоятельного сильноточного (до нескольких сотен ампер) тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Упрощенная схема системы генерации пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом приведена на рис. 1. Пучково-плазменное образование – плазменная среда, основные свойства (состав, однородность) и параметры ( $n_e$ ,  $T_e$ ,  $U_{pl}$ ) которой определяются пучком частиц (электронов, ионов, фотонов, быстрых нейтральных частиц), инжектируемых в электро-разрядную систему, обеспечивающую зажигание и горение разряда в определенном диапазоне. В данном случае пучок электронов, инжектируемый из источника электронов на основе плазменного эмиттера в плазму, формируемую в полым катоде основного тлеющего разряда, ускоряется в прикатодном падении потенциала тлеющего разряда и затем рассеивается в результате первоначального отклонения при инжекции через сетчатый эмиссионный электрод сложной формы, ионизации, возбуждения молекул и атомов рабочего газа, упругого рассеивания в кулоновских взаимодействиях. Особенностью является относительно низкое (100–200 В) напряжение горения основного тлеющего разряда.

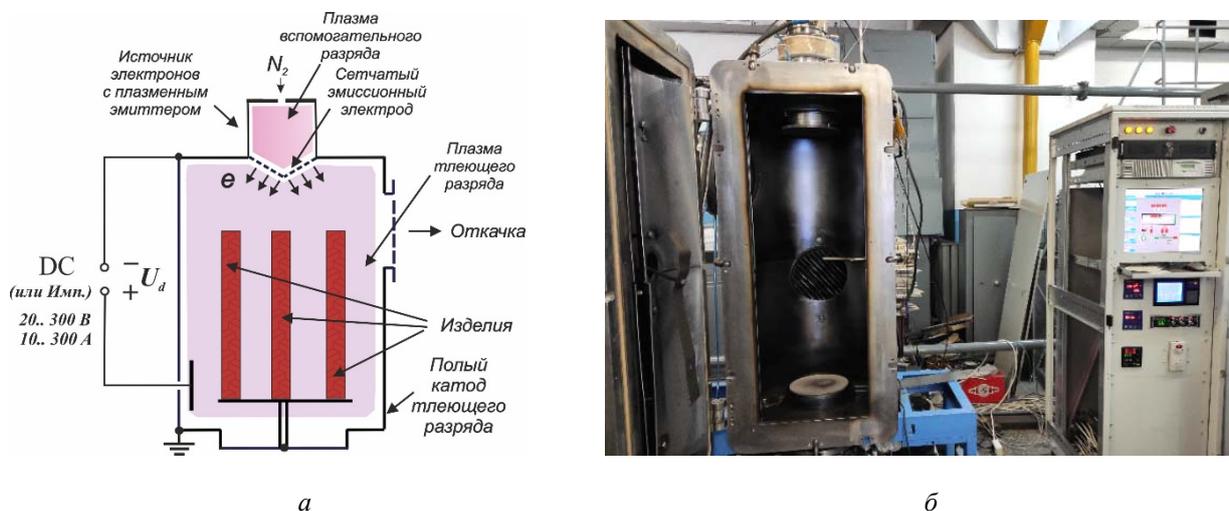


Рис. 1. Схема системы генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления (а) и ионно-плазменная установка для обработки изделий в газовых пучково-плазменных образованиях (б)

В такой системе существует возможность генерации стационарной плазмы с концентрацией в диапазоне ( $10^9$ – $10^{12}$ )  $\text{см}^{-3}$  при давлении около 1 Па, возможность независимой регулировки такими параметрами как рабочее давление, ток разряда, энергия ионов на подложку, плотность ионного тока на подложку, состав рабочей смеси, а также позволяет формировать низкотемпературную плазму в больших вакуумных объемах с низкой степенью неоднородности [1].

В результате цикла исследований разработаны режимы ионно-плазменного азотирования ряда конструкционных и инструментальных сталей в пучково-плазменных образованиях, генерируемых в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом. В частности, разработана методика управления фазовым составом поверхности штамповых сталей 4X5MФС, X12MФ, X12M в процессе ионно-плазменного азотирования, позволяющая избегать формирования на поверхности хрупкого нитридного («белого») слоя, состоящего из фаз  $\epsilon$ - $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$  и  $\gamma'$ - $\text{Fe}_4\text{N}$ .

Задача азотирования поверхности изделий сложной геометрии и формы из конструкционных материалов, например, деталей мелко модульных зубчатых передач (рис. 2, а), используемых в различных приводах и механизмах поворота ответственных узлов КА, эффективно решается в газовом импульсном пучково-плазменном образовании, генерируемом на установке

Использование импульсного режима генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде позволяет до нескольких раз снизить неоднородность толщины азотированного слоя на поверхности конструкционной стали 38X2MЮА (рис. 2, б).

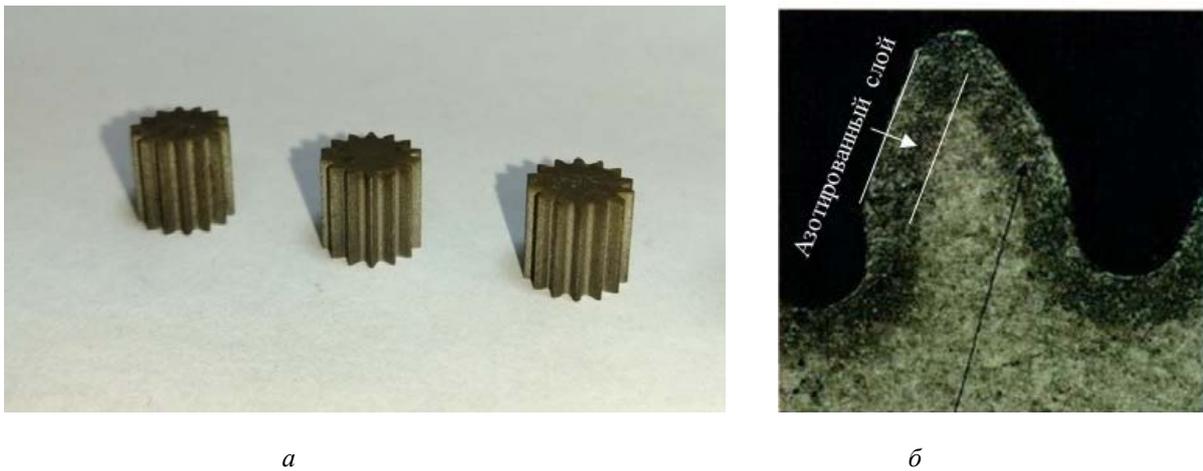


Рис. 2. Зубчатые венцы с мелким модулем зуба после азотирования (а) и поперечное сечение зуба шестерни после азотирования, темная область – азотированный слой (б)

Проведенные исследования взаимосвязи между параметрами плазмы, условиями пучково-плазменного воздействия на поверхность конструкционной стали 38Х2МЮА и результатами изменения физико-механических свойств стали после азотирования позволили разработать режимы ионно-плазменной обработки поверхности выпускаемого промышленностью изделия и внедрить их в производственный процесс предприятия.

#### Библиографическая ссылка

1. V.V. Denisov, Yu.H. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, P.M. Schanin The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas 26, 123510 (2019).

#### Reference

1. V.V. Denisov, Yu.H. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, P.M. Schanin The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas 26, 123510 (2019).

© Денисов В. В., Денисова Ю. А., Коваль Н. Н., Ковальский С. С.,  
Леонов А. А., Игнатов Д. Ю., Островерхов Е. В., Тересов А. Д.,  
Тищенко В. Н., Савчук М. В., Яковлев В. В., 2022

УДК 621.785.532

## УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ АЗОТИРОВАННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ\*

А. А. Леонов\*, Ю. А. Денисова, В. В. Денисов, В. Н. Тищенко, М. В. Савчук

Институт сильноточной электроники СО РАН  
Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3  
\* E-mail: laa-91@yandex.ru

*Разработаны режимы азотирования в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом, при которых регулируется фазовый состав азотированного слоя легированной стали, широко применяемой в ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: фазовый состав, рентгеноструктурный анализ, азотирование, сталь.*

## CONTROL OF THE PHASE COMPOSITION OF NITRIDATED ALLOY STEELS

A. A. Leonov\*, Yu. A. Denisova, V. V. Denisov, V. N. Tishchenko, M. V. Savchuk

Institute of High Current Electronics SB RAS  
2/3, Akademicheskij prospect, Tomsk, 634055, Russian Federation  
\* E-mail: laa-91@yandex.ru

*The regimes of nitriding in the plasma of a non-self-sustained glow discharge with a hollow cathode are developed, in which the phase composition of the nitrided layer of alloyed steel is controlled, which is widely used in the rocket and space industry.*

*Keywords: phase composition, X-ray diffraction analysis, nitriding, steel.*

**Введение.** При азотировании изделий из сталей конструкционного и инструментального назначения, к которым относятся штамповый инструмент, мелко модульные зубчатые передачи, прецизионные пары трения, для обеспечения заданного срока службы деталей требуется обеспечить заданный фазовый состав азотированного слоя. Для реализации процесса азотирования требуется обеспечить следующее: нагрев стальной поверхности до определенной температуры, высокую химическую активность поверхности путем устранения загрязнений и оксидных пленок, поступление насыщающего элемента, азота, из плазменной среды к поверхности в атомарном состоянии, либо диссоциацию молекулярного азота на обрабатываемой поверхности. Более ранние исследования [1] показывают, что при низком, около 1 Па, давлении насыщающая среда способна с избытком поставлять к поверхности азот, диффундирующий вглубь азотируемого изделия. Наиболее медленной стадией этого процесса, протекающего одновременно на границе плазма-твердое тело в результате процесса хемосорбции и в твердом теле, является стадия диффузии азота вглубь материала. По причине ограниченной скорости диффузии, азот накапливается в приповерхностном слое металла и происходит образование хрупких нитридных фаз ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Предпочтительным для этих случаев, особенно при ударных рабочих нагрузках, является твердый раствор азота в азотированном слое. Регулировка потока азота на поверхность стали в процессе азотирования в плазме тлеющего разряда достигается снижением парциального давления азота. При этом поддержание стабильного горения разряда и эффективности ионной очистки поверхности достигается добавлением аргона в азотсодержащую смесь. Изменение

\* Азотирование образцов производили в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001. Исследования фазового состава выполнены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 2.1.15.

содержания азота в плазме тлеющего разряда будет влиять на фазовый состав формируемого азотированного слоя.

**Материалы и методы.** В качестве материала для исследования использовали штамповую сталь X12MФ (1,45-1,65 масс. % С; 11–12,5 масс. % Cr; 0,4–0,6 масс. % Mo; 0,15–0,3 масс. % V). Азотирование штамповой стали проводили в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом на экспериментальной установке. В качестве рабочего газа использовали азот высокой чистоты и смесь газов Ar+N<sub>2</sub>. Определение влияния содержания азота в азот-аргоновой газовой смеси на свойства азотированного слоя проводилось при одном и том же давлении 1 Па для следующих значений содержания азота в рабочей смеси: 100, 50, 25 и 10 %. Ток тлеющего разряда составлял несколько десятков ампер.

На держатель образцов, который располагался в центре камеры, подавалось электрическое смещение U<sub>см</sub> (–200, –600 В) от отдельного источника питания. Температура образцов во время азотирования составляла 520 °С, время азотирования 3 ч. Нагрев и очистка поверхности образцов осуществлялись под действием бомбардировки ионами азота и аргона. Фазовый состав покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-7000S с излучением CuKα. Анализ фазового состава проведен с использованием программы Crystallographica Search-Match и баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа Powder Cell 2.4.

**Результаты и их обсуждение.** При исследовании микроструктуры поверхности образцов (рис. 1) было выявлено, что после азотирования в смеси с содержанием азота в газовой смеси 100 %, 50 % и 25 % структура поверхности стали X12MФ состоит из тонкого нитридного слоя и диффузионного слоя. В газовой смеси с содержанием азота 10 % (парциальное давление азота около 0,15 Па) наблюдается только диффузионный слой, нитридный слой отсутствует.

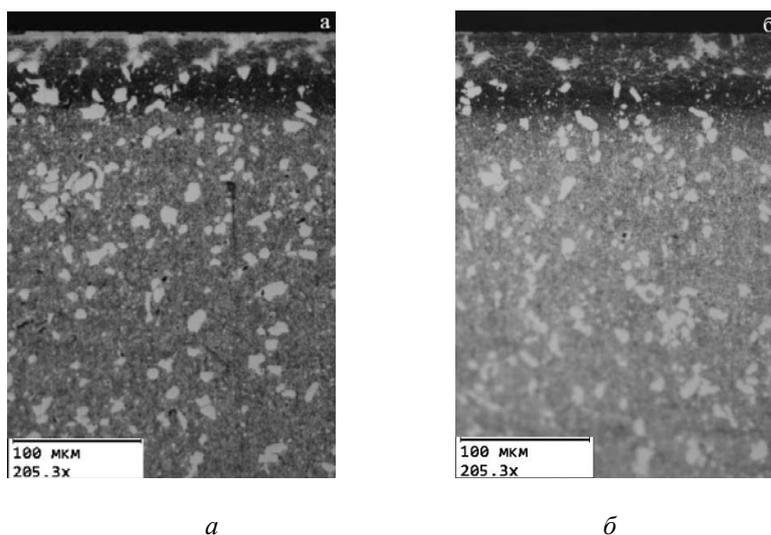


Рис. 1. Изображение микроструктуры стали X12MФ после азотирования в плазме тлеющего разряда низкого давления при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси:

*a* – N<sub>2</sub>(100 %); *б* – N<sub>2</sub>(10 %)+Ar(90 %); напряжение смещения U<sub>см</sub> = – 200 В

Одним из важных преимуществ использования азотсодержащей плазмы при низком давлении является возможность контроля фазового состава на азотированной поверхности стали. Результаты рентгенофазового анализа стали X12MФ после азотирования представлены на рис. 2. Видно, что нитридный слой состоит из нитридных фаз ε-Fe<sub>2-3</sub>N и γ'-Fe<sub>4</sub>N. Основной фазой является ε-Fe<sub>2-3</sub>N. Снижение содержания азота в газовой смеси приводит к увеличению γ'-фазы (табл. 1).

Помимо ε- и γ'-фаз в поверхностном слое присутствуют еще нитриды (CrN) и карбиды (Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) хрома. Для состава газовой смеси N<sub>2</sub>(10 %)+Ar(90 %), как и было зафиксировано при исследованиях микроструктуры сталей, нитридный слой на поверхности отсутствует, формируются только твердый раствор азота в железе (α-Fe) и фазы нитридов и карбидов хрома (рис. 2, табл. 1).

**Фазовый состав стали X12МФ после азотирования при разных соотношениях аргона и азота в газовой смеси**

Рабочий газ	Содержание обнаруженных фаз, масс. %				
	$\epsilon$ -Fe <sub>2,3</sub> N	$\gamma'$ -Fe <sub>4</sub> N	$\alpha$ -Fe	CrN	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
N <sub>2</sub> (100%)	43	20	—	19	18
N <sub>2</sub> (50%)+Ar(50%)	42	23	—	18	17
N <sub>2</sub> (25%)+Ar(75%)	43	37	—	19	1
N <sub>2</sub> (10%)+Ar(90%)	2	—	66	12	20

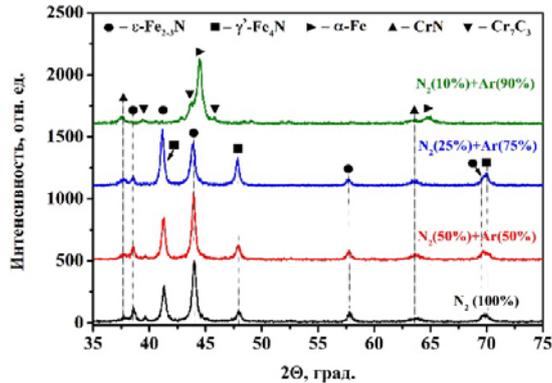


Рис. 2. Участки дифрактограмм образцов стали X12МФ после азотирования при разных соотношениях аргона и азота в рабочей газовой смеси

**Выводы.** Таким образом, в результате исследований закономерностей эволюции фазового состава и структуры азотированного слоя стали, сформированного после обработки в азотосодержащей плазме для различного содержания азота в рабочей смеси, можно сделать вывод, что содержание азота играет определяющую роль в формировании фазового состава поверхностного слоя при азотировании. Было установлено, что образцы азотированные по режиму N<sub>2</sub>(10%)+Ar(90%), при котором не формируются фазы  $\epsilon$ -Fe<sub>2,3</sub>N и  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N, обладают наилучшими триботехническими свойствами.

**Библиографическая ссылка**

1. Denisova Y., Leonov A., Denisov V. et al. Influence of nitrogen content in the working gas mixture on the structure and properties of the nitrided surface of die steel // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 2020. P.522-525.

**Reference**

1. Denisova Y., Leonov A., Denisov V. et al. Influence of nitrogen content in the working gas mixture on the structure and properties of the nitrided surface of die steel // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 2020. P.522-525.

© Леонов А. А., Денисова Ю. А., Денисов В. В., Тищенко В. Н., Савчук М. В., 2022

УДК 620.18

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

О. Р. Лузанов<sup>1,3\*</sup>, А. А. Снежко<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>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 аддитивных технологий, основанных на печати порошком и 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 FEATURES OF LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS OF METAL PARTS

O. R. Luzanov<sup>1,3\*</sup>, A. A. Snezhko<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>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 technologies based on powder and 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.*

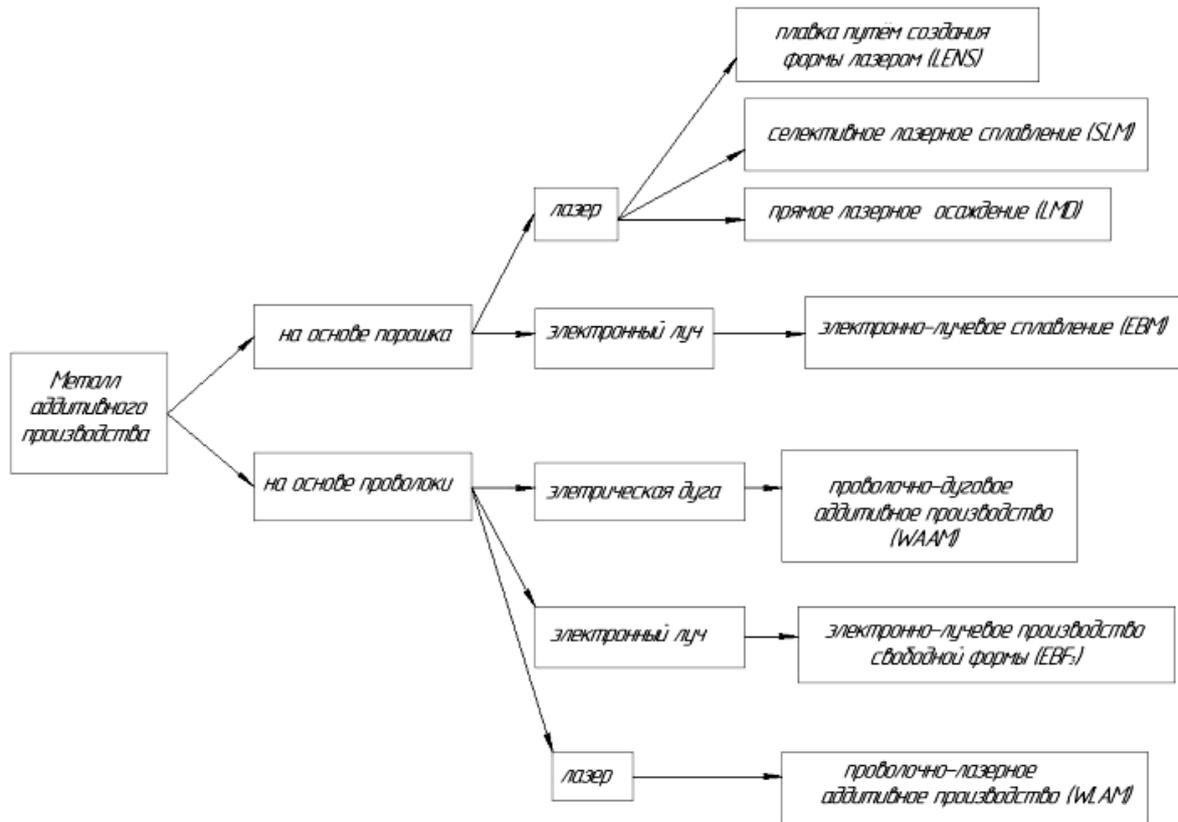
Под аддитивными технологиями понимают (AM – Additive Manufacturing, AF–Additive Fabrication) процессы, которые позволяют изготавливать изделия за счет послойного синтеза или послойного выращивания изделий по цифровой 3D-модели [1].

Стандарт ISO/ASTM 52900:2015 стал основой для первого Российского стандарта ГОСТ Р 57558–2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения», который вступил в силу с 1 декабря 2017 г. и содержит базовые технические понятия. Изначально (см. рисунок), аддитивные технологии металлов можно разделить на два вида в зависимости от сырья – на основе порошка и на основе проволоки.

Аддитивные технологические процессы в соответствии с ASTM F2792.1549323-1 (США) подразделяется на следующие категории:

1. Material Extrusion – «выдавливание материала».
2. Material Jetting – «разбрызгивание материала», «струйные технологии».
3. Binder Jetting – «разбрызгивание связующего».
4. Sheet Lamination – «соединение листовых материалов».
5. Vat Photopolymerization – «фотополимеризация в ванне».

6. Powder Bed Fusion – «расплавление материала в заранее сформированном слое».  
 7. Directed energy deposition – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения».  
 Аналогичная классификация реализована и в ГОСТ Р 57558–2017 [2].



Классификация AM [3]

В порошковой технологии металлический порошок плавится с использованием лазерного луча или электронного луча, такого как селективное лазерное плавление (SLM), процесс лазерного осаждения металла (LMD) и электронно-лучевой плавки (EBM) [4-5].

Однако скорость осаждения низкая, несмотря на очень высокую точность допуска размеров. Использование порошка в качестве исходного сырья приводит к образованию таких дефектов, как поры, которые могут снизить структурную целостность детали.

По сравнению с порошковой технологией преимуществом проволочно-дуговой аддитивной технологии является значительно более высокая скорость осаждения и неограниченная рабочая зона изготовления детали. Используемая в процессе проволока плавится с помощью лазера, электронного луча или электрической дуги. Этот процесс включает в себя, например, аддитивное производство проволочной дуги (WAAM), аддитивное производство проволоки и лазера (WLAM), изготовление свободной формы с помощью электронного луча (EBF) и лазерное формование сетки (LENS) [6-7].

Среди этих трех источников энергии лазер является наиболее распространенным из-за его более высокой точности при формовании деталей. Однако данный процесс характеризуется низкой энергоэффективностью (2–5%). Более популярным источником энергии для реализации проволочно-дуговой аддитивной технологии является электронный пучок из-за его более высокой энергоэффективности (15–20%). Однако, дополнительно требуется рабочая среда с идеальным вакуумом. Отмечают, что эти два источника энергии используют очень высокую плотность энергии, что приводит к превосходным размерным свойствам напечатанных деталей, но имеют несколько недостатков, таких, как низкая скорость осаждения, высокая стоимость и ограниченный размер компонентов [3].

В настоящее время большой практический и научный интерес проявляется к потенциалу технологии WAAM, использующей электрическую дугу в качестве источника энергии и сплошную проволоку

ку в качестве исходного материала. Из возможных вариантов реализации: дуговая сварка металлическим электродом (GMAW), дуговая сварка вольфрамовым электродом (GTAW) или плазменная дуговая сварка (PAW) [8].

WAAM имеет огромный потенциал для снижения затрат и отходов материалов с учетом сокращения времени на выполнение заказов. Способность создавать аккуратную сетчатую форму при высокой скорости осаждения создает особое преимущество. Автомобильная и авиационно-космическая промышленность является одной из движущих сил развития WAAM в направлении разработок легких конструкций из титановых или алюминиевых сплавов [3].

WAAM превосходит другие методы аддитивного производства в производстве крупносерийного продукта благодаря своей высокой эффективности и низкой стоимости сырья. Кроме того, стоимость металлической проволоки как сырья составляет примерно 10% от стоимости порошкового сырья. Таким образом, процесс WAAM обеспечивает высокое осаждение при низких затратах, что делает его весьма предпочтительным для производства крупногабаритных изделий с использованием дорогих материалов. Однако его эффективность объясняется высокими энергоемкостью и скоростью подачи проволоки.

Технология WAAM, независимо от вида сварочного процесса, обеспечивает высокую скорость наплавки до 5 кг/ч на нержавеющей стали или 2,5 кг/ч на сплаве Ti-6Al-4V. По мере увеличения скорости подачи проволоки воздействие силы дуги приводит к низкому качеству формовки. Деформация и остаточные напряжения, вызванные повышенной скоростью могут повлиять на геометрическую точность и ухудшить механические свойства компонентов, что объясняется чрезмерным подводом тепла, высокой скоростью осаждения и большим температурным градиентом.

Главным вектором развития данной технологии является работа над снижением подводимого тепла с целью достижения превосходного качества изготовления деталей с точки зрения макроструктуры, микроструктуры, механических свойств.

### Библиографические ссылки

1. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О.Н. Гончарова, Ю.М. Бережной, Е.Н. Бессарабов, Е.А. Кадамов, Т.М. Гайнутдинов, Е.М. Нагопетьян, В.М. Ковина // [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-dinamichno-razvivayusheesya-proizvodstvo/viewer>. (дата обращения: 19.08.2022)

2. КЛАССИФИКАЦИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ. / В. А. Дресвянников, Е. П. Страхов // [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-additivnyh-tehnologiy-i-analiz-napravleniy-ih-ekonomicheskogo-ispolzovaniya>. (дата обращения: 19.08.2022)

3. Обзор влияния подводимого тепла для проволочно-дугового аддитивного производственного процесса. / Нор Ана Росли, Мохд Ризал Алкахари, Мохд Фадзли бин Абдолла, Шаджахан Майдин, Фаиз Редза Рамли, Сафарудин Газали Хераван. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/349114574\\_Review\\_on\\_effect\\_of\\_heat\\_input\\_for\\_wire\\_arc\\_additive\\_manufacturing\\_process](https://www.researchgate.net/publication/349114574_Review_on_effect_of_heat_input_for_wire_arc_additive_manufacturing_process). (дата обращения: 20.08.2022)

4. Альфред Т. Сидамбе / Биосовместимость современных титановых имплантатов – Обзор // [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.3390/ma7128168>. (дата обращения: 21.08.2022).

5. Журнал «Аддитивные технологии» №2-2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/lazernye-additivnye-tehnologii-perspektivy-primeneniya.html>. (дата обращения: 22.08.2022).

6. Современные технологии производства [Электронный ресурс]. URL: <https://extxe.com/3834/sushhnost-i-osobnosti-additivnyh-tehnologij/>. (дата обращения: 22.08.2022).

7. 3D Сегодня [Электронный ресурс]. URL: [https://3dtoday.ru/wiki/EBF%C8%9D\\_print/](https://3dtoday.ru/wiki/EBF%C8%9D_print/). (дата обращения: 22.08.2022).

8. Проволочно-дуговое аддитивное производство: Обзор последних открытий и проблем в области промышленного применения и характеристики материалов. / Мукти Чатурведи, Елена Скутельнику, Кармен Каталина Русу, Луиджи Ренато Мистоди, Данут Михайлеску и Арунгалай Вендан Суббия [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.3390/met11060939>. (дата обращения: 22.08.2022).

### References

1. Additive technologies – dynamically developing production / O.N. Goncharova, Yu.M. Berezhnoy, E.N. Bessarabov, E.A. Adamov, T.M. Gainutdinov, E.M. Nagopetyan, V.M. Kovenya // Available at:

<https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-dinamichno-razvivayuscheesya-proizvodstvo/viewer>. (accessed: 19.08.2022).

2. CLASSIFICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES AND ANALYSIS OF DIRECTIONS OF THEIR ECONOMIC USE / V. A. Dresvyannikov, E. P. Strakhov // Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-additivnyh-tehnologiy-i-analiz-napravleniy-ih-ekonomicheskogo-ispolzovaniya>. (accessed: 19.08.2022).

3. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. / Nor Ana Rosli, Mohd Rizal Alkahari, Mohd Fadzli bin Abdollah, Shajahan Maidin, Faiz Redza Ramli, Safarudin Gazali Herawan // Available at: [https://www.researchgate.net/publication/349114574\\_Review\\_on\\_effect\\_of\\_heat\\_input\\_for\\_wire\\_arc\\_additive\\_manufacturing\\_process](https://www.researchgate.net/publication/349114574_Review_on_effect_of_heat_input_for_wire_arc_additive_manufacturing_process). (accessed: 20.08.2022).

4. Alfred T. Sidambe / Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants – A Review // Available at: <https://doi.org/10.3390/ma7128168>. (accessed: 21.08.2022).

5. Journal of Additive Technologies. Available at: <https://extxe.com/3834/sushhnost-i-osobennosti-additivnyh-tehnologij/>. (accessed: 22.08.2022).

6. Modern production technologies. Available at: <https://extxe.com/3834/sushhnost-i-osobennosti-additivnyh-tehnologij/>. (accessed: 22.08.2022).

7. 3D Today. Available at: [https://3dtoday.ru/wiki/EBF%C8%9D\\_print/](https://3dtoday.ru/wiki/EBF%C8%9D_print/). (accessed: 22.08.2022).

8. Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization / Mukti Chaturvedi, Elena Scutelnicu, Carmen Catalina Rusu, Luigi Renato Mistodie, Danut Mihailescu and Arungalai Vendan Subbiah // Available at: <https://doi.org/10.3390/met11060939>. (accessed: 22.08.2022).

© Лузанов О. Р., Снежко А. А., 2022

УДК 620.18

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЕТАЛЕЙ  
НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА  
ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ**

О. Р. Лузанов<sup>1,3\*</sup>, А. А. Снежко<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>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, 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 аддитивных технологий, основанных на печати металлической проволокой (WAAM) и направлений развития для различных промышленных отраслей машиностроения в том числе ракетостроения.*

*Ключевые слова: проволоочно-дуговое аддитивное производство, материалы.*

**THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF PARTS  
ON THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS  
BY ARC SURFACING**

O. R. Luzanov<sup>1,3\*</sup>, A. A. Snezhko<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>Siberian Fire and Rescue Academy  
1, Severnaya Sr., 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 technologies based on metal wire printing (WAAM) and development directions for various industrial branches of mechanical engineering, including rocket engineering.*

*Keywords: WAAM, materials.*

Среди различных аддитивных методов проволоочно-дуговое производство (WAAM) подходит для выпуска крупных металлических деталей благодаря достигаемым высоким скоростям наплавки, которые значительно выше, чем, например, при использовании порошковой технологии [1].

Исследования в области WAAM позволят разработать новые методы программного проектирования, расширяющие технологические возможности с учетом химического состава материалов для качественной печати деталей.

Интеграция процесса WAAM и критерии оценок, которые постоянно исследуются исследователями для дальнейшего совершенствования, показана на рис. 1 [2].

WAAM относится к категории прямого выделения энергии согласно стандарту ASTM F2792-12a и определяется как комбинация электрической дуги, используемой в качестве источника тепла и проволоки, используемой в качестве исходного материала. Процесс схематически представлен на рис. 2.

WAAM опирается на фундаментальные концепции автоматизированных сварочных процессов, таких как: дуговая сварка металлическим электродом в среде защитного газа (GMAW), плазменно-дуговая сварка (PAW) и дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде защитного газа (GTAW) [1].

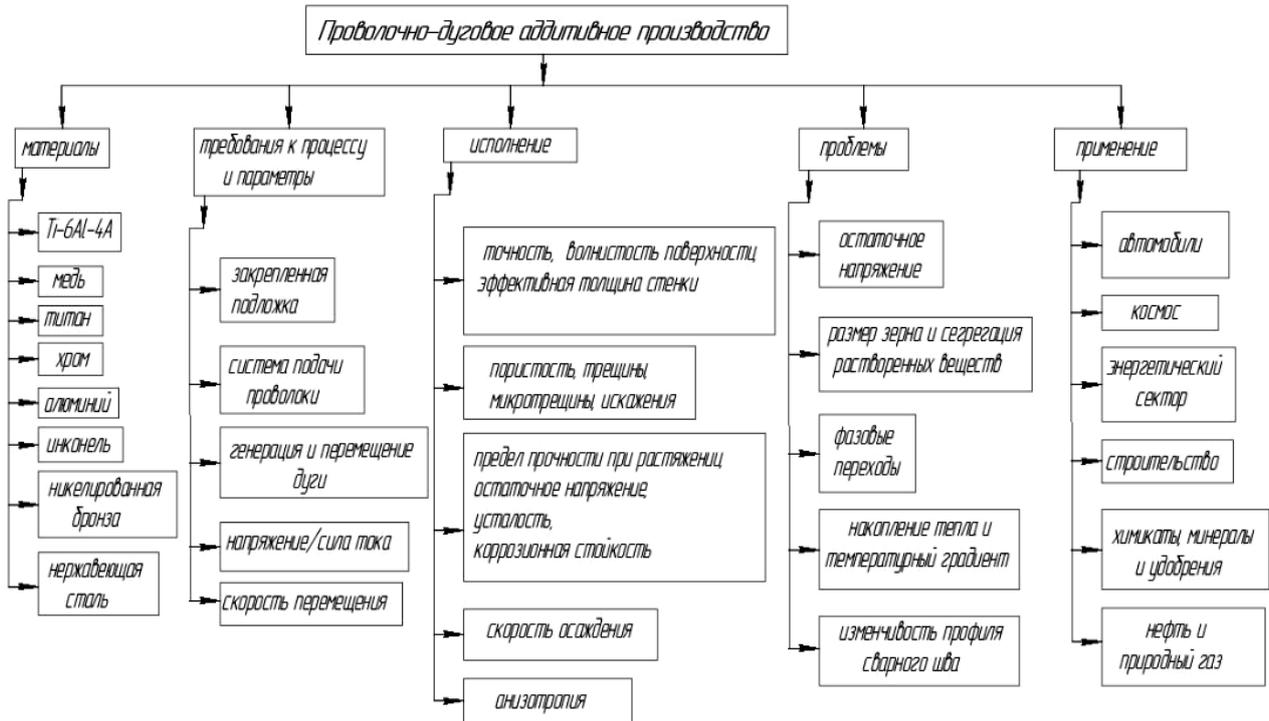


Рис. 1. WAAM и потенциальные направления в области развития

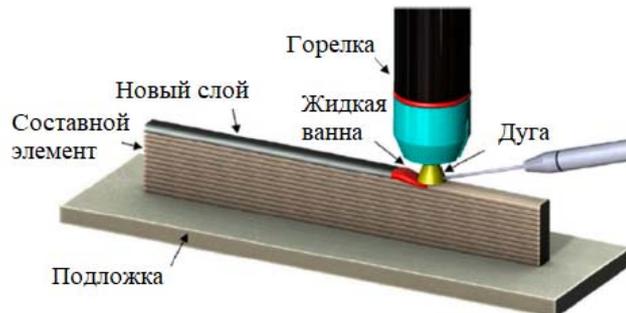


Рис. 2. Схематическое изображение процесса проволочно-дугового аддитивного производства

В процессах WAAM используется широкий спектр коммерчески доступных сварочных проволок из многих сплавов, которые производятся для сварочной промышленности и используются в качестве исходного материала. Для изготовления бездефектного и надежного компонента требуется четкое знание доступных вариантов технологического процесса, методов управления технологическим процессом и подходящего исходного материала для конкретного применения [3].

Сплавы на основе титана все чаще применяются в WAAM, что позволяет снизить высокие затраты, связанные с обработкой деталей из этих материалов при изготовлении традиционными технологиями (литья, штамповки и др.). Сплавы на основе Ti обладают высокой прочностью, ударной вязкостью, хорошей коррозионной стойкостью и могут выдерживать экстремальные температуры без значительной потери механических свойств, что делает их пригодными для аэрокосмического и био-медицинского применения. Сплавы Ti составляют около 15% от общего веса самолета Boeing 787,

благодаря их электрохимической совместимости с полимерными композитами из углеродного волокна. Среди различных процессов аддитивного производства WAAM позволяет лучше контролировать микроструктуру этих полиморфных сплавов, поскольку эти материалы очень чувствительны к термической обработке. Ti-6Al-4V является наиболее часто используемым сплавом Ti и, следовательно, наиболее изученным в WAAM [1].

Суперсплавы на основе никеля являются вторым по популярности материалом, изучаемым сообществом исследователей аддитивного производства после титановых сплавов, главным образом из-за их высокой прочности при повышенных температурах и высокой стоимости изготовления традиционными методами. Сплавы на основе никеля широко применяются в аэрокосмической, авиационной, нефтехимической, химической и морской промышленности благодаря их выдающейся прочности и стойкости к окислению при температурах выше 550°C. На сегодняшний день различные сплавы на основе никеля, включая сплавы Inconel 718 и Inconel 625, были исследованы после обработки WAAM [4].

Пористость при сварке алюминия является серьезной проблемой и одним из основных факторов, ограничивающих применение алюминия в области WAAM. Получение алюминиевых заготовок посредством аддитивных технологий возможно за счет холодного переноса металла (СМТ) что до сих пор представляет интерес для многих исследователей.

Заслуживающие внимания преимущества СМТ процесса включают не только меньшую тепловую нагрузку с изменением скорости выгорания электрода, но и отличный контроль над проплавлением с высокой эффективностью плавления проволоки и высокой скоростью осаждения в сравнении с обычным процессом GMAW [5].

Высокая пластичность и коррозионная стойкость являются ключевыми причинами для привлечения ряда исследований, направленных на изготовление деталей из нержавеющей стали с использованием технологии WAAM. Исследования показывают, что WAAM обладает способностью производить детали из нержавеющей стали с хорошими механическими свойствами и микроструктурой. Поскольку микроструктура стали в основном содержит аустенитную фазу, тогда как при сварке или наплавке можно обнаружить комбинированную форму аустенита и феррита. Важными факторами, определяющими фазовую долю нержавеющей стали, являются термический цикл и химический состав. Детали из нержавеющей стали, изготовленные WAAM, также нашли широкое применение в производстве из высокоэффективных легированных компонентов.

Для усовершенствования метода WAAM необходимы дальнейшие исследования и разработки с учетом специфики материаловедческих аспектов. Необходимо разработать конструкции систем для адаптации конкретных программных приложений на основе требований. При прогнозировании дефектов более точным и полезным оказался анализ, произведенный методом конечных элементов (FEA), интеграция с которым сделает WAAM более мощной и действенной технологией.

Автоматизированное программное обеспечение WAAM позволит планировать траектории, стратегию сборки, осуществлять контроль напряжений и искажений, проводить онлайн-мониторинг процесса и неразрушающий контроль, что позволит уменьшить количество дефектов при изготовлении деталей.

В будущем WAAM может быть использован для изготовления широкого спектра изделий, например, облегченных газотурбинных двигателей, модернизированных до высокого уровня температурной стабильности, экономичности, отсутствия коррозии [6].

### Библиографические ссылки

1. Текущее состояние и перспективы проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM). Тиаго А. Родригеш, В. Дуарте., Р.М. Миранда, Тельмо Г. Сантуш и Ж. П. Оливейра. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/332219846\\_Current\\_Status\\_and\\_Perspectives\\_on\\_Wire\\_and\\_Arc\\_Additive\\_Manufacturing\\_WAAM](https://www.researchgate.net/publication/332219846_Current_Status_and_Perspectives_on_Wire_and_Arc_Additive_Manufacturing_WAAM) (дата обращения: 24.08.2022).
2. Проволочно-дуговое аддитивное производство: обзор последних результатов и проблем в области промышленного применения и характеристики материалов. Мукти Чатурведи, Елена Скутельнику, Кармен Каталина Русу, Луиджи Ренато Мистоди, Данут Михайлеску и Арунгалай Вендан Суббия.. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/352265905\\_Wire\\_Arc\\_Additive\\_Manufacturing\\_Review\\_on\\_Recent\\_Findings\\_and\\_Challenges\\_in\\_Industrial\\_Applications\\_and\\_Materials\\_Characterization](https://www.researchgate.net/publication/352265905_Wire_Arc_Additive_Manufacturing_Review_on_Recent_Findings_and_Challenges_in_Industrial_Applications_and_Materials_Characterization) (дата обращения: 25.08.2022).
3. Банти Томар С. Шива, Тамешвер Натх. Обзор проволочно-дугового аддитивного производства: параметры обработки, дефекты, улучшение качества и последние достижения. [Электронный ре-

сурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492822005992> (дата обращения: 25.08.2022).

4. Обзор проволочно-дугового аддитивного производства: свойства, дефекты и улучшение качества. Бинтао Ву, Цзэнси Пань, Донхонг Дин, Доминик Кююри, Хуэйцзюнь Ли, Цзин Сюй, Джон Норриш. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612518310739> (дата обращения: 26.08.2022).

5. К.С. Дерекар. Обзор проволочно-дугового аддитивного производства и достижения в области проволочно-дугового аддитивного производства из алюминия. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02670836.2018.1455012> (дата обращения: 25.08.2022).

6. Судханшу Ранджан Сингх, Прадип Кханна. Проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM): новый процесс придания формы инженерным материалам. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320358922> (дата обращения: 25.08.2022).

### References

1. Tiago A. Rodrigues, V. Duarte, R.M. Miranda, Telmo G. Santos and J.P. Oliveira. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/332219846\\_Current\\_Status\\_and\\_Perspectives\\_on\\_Wire\\_and\\_Arc\\_Additive\\_Manufacturing\\_WAAM](https://www.researchgate.net/publication/332219846_Current_Status_and_Perspectives_on_Wire_and_Arc_Additive_Manufacturing_WAAM) (accessed: 24.08.2022).

2. Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization. Mukti Chaturvedi, Elena Scutelnicu, Carmen Catalina Rusu, Luigi Renato Mistodie, Danut Mihailescu and Arungalai Vendan Subbiah. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/352265905\\_Wire\\_Arc\\_Additive\\_Manufacturing\\_Review\\_on\\_Recent\\_Findings\\_and\\_Challenges\\_in\\_Industrial\\_Applications\\_and\\_Materials\\_Characterization](https://www.researchgate.net/publication/352265905_Wire_Arc_Additive_Manufacturing_Review_on_Recent_Findings_and_Challenges_in_Industrial_Applications_and_Materials_Characterization) (accessed: 25.08.2022).

3. Buntly Tomar, S.Shiva, Tameshwer Nath. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492822005992> (accessed: 25.08.2022).

4. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. Обзор аддитивного производства металлов проволочной дугой: свойства, дефекты и улучшение качества. Bintaо Wu, Zengxi Pan, Donghong Ding, Dominic Cuiuri, Huijun Li, JingXu, JohnNorrish. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612518310739> (accessed: 25.08.2022).

5. K. S. Derekar. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02670836.2018.1455012> (accessed: 25.08.2022).

6. Sudhanshu Ranjan Singh, Pradeep Khanna. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320358922> (accessed: 25.08.2022).

© Лузанов О. Р., Снежко А. А., 2022

УДК 52-08

## КОНТРОЛЬ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ СТАНКОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА

М. Н. Надежин, А. А. Харина, М. В. Карабонцева, Н. В. Карабонцева, Г. А. Мацур

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail maxblack96@mail.ru

*В статье представлен метод контроля угловых и линейных перемещений шпинделя и поворотного стола станка с помощью КИМ, позволяющий достичь высокой точности изготовления ДСЕ и минимизировать отклонения геометрических параметров изготавливаемой продукции от заданных размеров в конструкторской документации.*

*Ключевые слова:* координатно-измерительная машина (КИМ), метрология, поверка, станки.

## CONTROL OF ANGULAR AND LINEAR MOVEMENTS OF MACHINE MOVING PARTS USING LAZER TRACKER

M. N. Nadezhin, A. A. Harina, M. V. Karabonceva, N. V. Karabonceva, G. A. Matsur

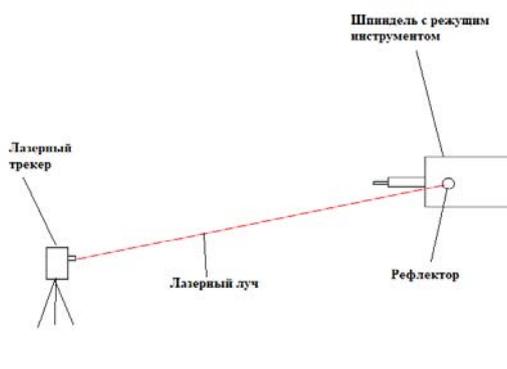
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail maxblack96@mail.ru

*The article presents the methods of angular and linear displacements of the spindle and the rotary table machine using CMM, the maximum achievement of the maximum value of the production of DSE and the achievement of the limit of the geometric parameters of the control of manufactured products from the specified dimensions in the design documentation.*

*Keywords:* coordinate measuring machine (CMM), metrology, verification, machines.

**Введение.** Точность металлообработки является базовым критерием для оценки качества изделия. Приоритетная задача состоит в минимизации отклонений размеров изготавливаемой продукции от заданных параметров в конструкторской документации. Для решения этой проблемы проводится периодический контроль станков на технологическую точность [1]. В настоящее время для определения технологической точности используют универсальные инструменты (штангенциркули, микрометры, угломеры, калибры, индикаторы перемещений). С помощью лазерного трекера разработан метод контроля угловых и линейных перемещений шпинделя и поворотного стола станка [2].

**Описание метода.** На шпиндель станка устанавливается рефлектор и с помощью лазерного трекера в режиме реального времени отслеживается его перемещение (см. рисунок) [3].



Принцип действия метода

При отклонении результатов снятых с рефлектора от номинального вектора шпинделя в программу управления вносится корректировка для компенсации отклонений перемещения шпинделя от нормали. После корректировки операция повторяется, до достижения удовлетворительного результата [4].

**Заключение.** Данный метод нашел применение на предприятии АО «Красмаш», а именно при настройке перемещения манипулятора Автоматизированного электро-лучевого технологического комплекса (АЭЛТК) и может быть применен на всех предприятиях страны занимающих металлообработкой [5]. Итогом контрольных мероприятий становится вывод о возможности дальнейшего использования машины на данном производственном участке. Снижение технологической точности до недопустимых пределов становится основанием для коренной модернизации или замены станка.

#### Библиографические ссылки

1. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nordwesttool.ru/statyi/tochnost-stankov> (дата обращения: 29.07.2022).
2. Сайт [Электронный ресурс]. URL: [http://stanki-katalog.ru/st\\_57.htm](http://stanki-katalog.ru/st_57.htm) (дата обращения: 29.07.2022).
3. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://tbc-spb.ru/services/proverka-stankov/> (дата обращения: 02.08.2022).
4. Белецкий Д.Г. Справочник токаря-универсала. // М.: Машиностроение, 1987. с. 56-59
5. Чикуров Н.Г. Математические задачи координатно-измерительных машин: Монография // Издательство Инфра-М, серия научная мысль, 2021. С. 124-153.

#### References

1. Sayt [Electronic resource]. URL: <https://www.nordwesttool.ru/statyi/tochnost-stankov> (accessed: 29.07.2022).
2. Sayt [Electronic resource]. URL: [http://stanki-katalog.ru/st\\_57.htm](http://stanki-katalog.ru/st_57.htm) (accessed: 29.07.2022).
3. Sayt [Electronic resource]. URL: <https://tbc-spb.ru/services/proverka-stankov/> (accessed: 02.08.2022).
4. Beleckii D.G Universal turner's guide. // M.: Mashinostroenie, 1987. с. 56-59
5. Chikurov N.G. Mathematical problems of coordinate measuring machines: Monograph. // Publishing house Infra-M, scientific thought series, 2021. С. 124-153.

© Надежин М. Н., Харина А. А., Карабонцева М. В.,  
Карабонцева Н. В., Мацур Г. А., 2022

УДК 621.454.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. В. Остапенко<sup>1</sup>, М. И. Толстопятов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, Красноярск, проспект имени газеты «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: dmitriy.ostapenko.94@mail.ru

*В статье рассматривается сравнительный анализ методик термодинамического расчета жидкостных ракетных двигателей при равновесном и замороженном режиме. Полученные значения сравниваются с параметрами реальных ЖРД.*

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, удельный импульс в пустоте, стехиометрическое соотношение компонентов, действительное соотношение компонентов, коэффициент избытка окислителя, равновесный режим, замороженный режим.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS OF THERMODYNAMIC CALCULATION OF LIQUID ROCKET ENGINES

D. V. Ostapenko<sup>1</sup>, M. I. Tolstopyatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC

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: dmitriy.ostapenko.94@mail.ru

*The paper deals with the comparative analysis of the methods of thermodynamic calculation of liquid rocket engines at the equilibrium and frozen regime. The comparative of obtained values with the parameters of real liquid rocket engines.*

*Keywords: liquid rocket engine, specific impulse in vacuum, stoichiometric ratio of components, actual component ratio, ratio of an excess oxidizer, equilibrium regime, frozen regime.*

Важнейшим элементом ракетно-космической техники является жидкостный ракетный двигатель. Проектирование ЖРД достаточно трудоемкий процесс, в ходе которого необходимо определить основные параметры и характеристики двигателя на основе термодинамического расчета.

В настоящее время термодинамические расчеты можно выполнять с помощью персональных компьютеров в специализированных программных комплексах, где расчет проводится в равновесном и замороженном режимах, что существенно облегчает задачу. Однако при этом не учитываются различные виды потерь, влияющие на такие характеристики двигателя, как удельный импульс. Величина удельного импульса напрямую зависит от различного вида потерь, которые были заложены конструктором при проектировании, и состава продуктов сгорания полученного в ходе термодинамического расчета. Однако при испытаниях ЖРД полученные значения удельного импульса будут отличаться от расчетных [1].

По этой причине с целью сравнения методик [2], [3] был проведен термодинамический расчет ЖРД в равновесном и замороженном режиме по известным параметрам двигателей С5.92 [4] и РД-107 [5]. Выбор данных двигателей обусловлен тем, что применяемые топливные пары наиболее распространены в отечественном двигателестроении, также у них различные эксплуатационные характеристики

Термодинамический расчет проводился по параметрам, представленным в таблице.

Исходные данные для термодинамического расчета

Параметры	РД 107	C5.92
Рк, МПа	5,85	9,6
Da, м	0,72	0,4576
Дкр, м	0,1658	0,0369
Da/Дкр	4,34	12,4
И <sub>у.п.</sub> , м/с	3080	3204,6
Кд	2,47	1,95
Ко	3,408	3,062
$\alpha$	0,725	0,636
Окислитель	O2	N2O4
Горючее	СН1,956	С2Н8N2
Ю, кДж/кг	-398	-212
Г, кДж/кг	-1948	824

В результате расчета были построены графические зависимости удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя, а также состав продуктов сгорания для двух двигателей рис. 1, 2.

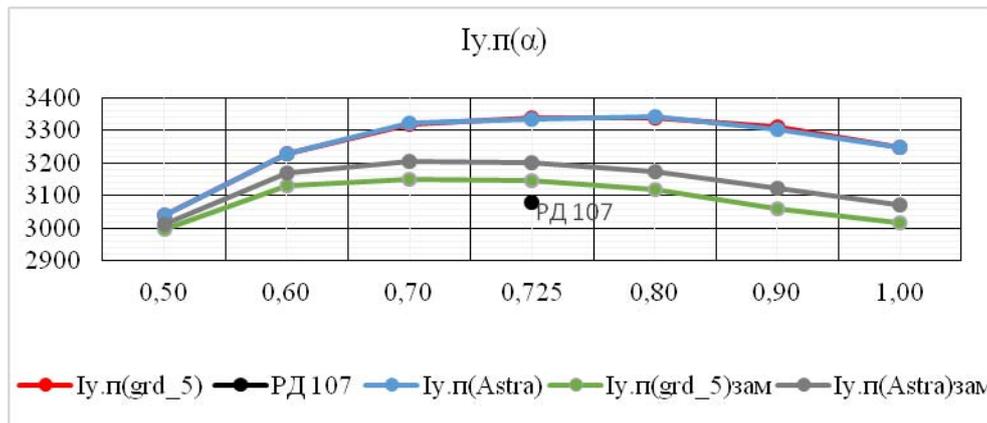


Рис. 1. Зависимость удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя в равновесном и замороженном режимах при параметрах РД-107

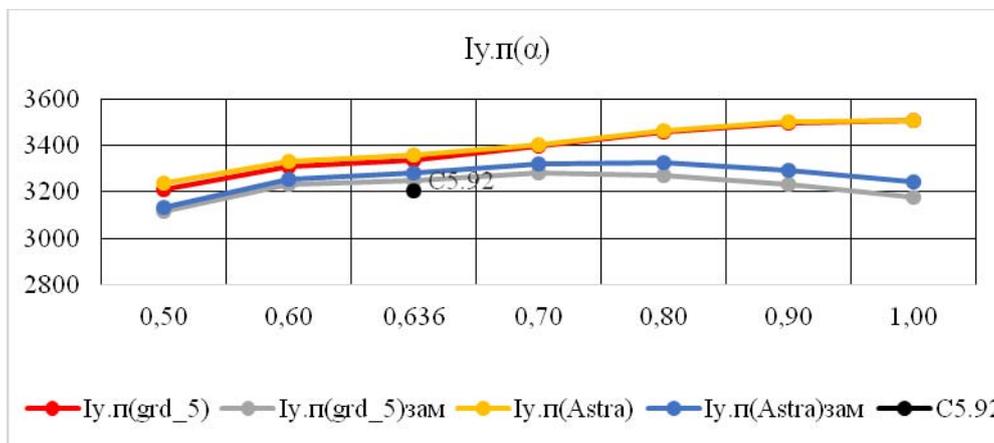


Рис. 2. Зависимость удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя в равновесном и замороженном режимах при параметрах C5.92

Как видно из графиков рис. 1, рис. 2, полученных по методикам [2], [3], значения удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя практически полностью совпадают при равновесном режиме, но отличаются при замороженном. Данное расхождение можно объяснить тем, что существует различие в продуктах сгорания. При этом значение удельного импульса в замороженном режиме достаточно близко к параметрам реальных двигателей, что говорит о верной реализации методик [2], [3] даже без учета потерь, имеющих в ЖРД.

#### Библиографические ссылки

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 484 с.
2. Горностаев В.И. Термодинамический расчет двигателя: Учеб. пособие. – Красноярск: САА, 1994. 39 с.
3. Трусов Б. Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 40 с.
4. ДВИГАТЕЛИ С5.92 И С5.221. РАЗГОННЫЙ БЛОК «ФРЕГАТ» [Электронный ресурс]. URL: /main.php?id=53 (Дата обращения:25.07.2022).
5. ЖРД РД-107 и РД-108 и их модификации [Электронный ресурс]. URL: [http://www.lpre.de/energomash /RD-107/index.htm](http://www.lpre.de/energomash/RD-107/index.htm) (Дата обращения:08.08.2022).

#### References

1. Dobrovolskiy M.V. Zhidkostnyye raketnyye dvigateli [Liquid-propellant rocket engines]. Moscow, BMSTU., Publ., 2005, 484p.
2. Gornostayev V.I. Termodinamicheskiy raschet dvigatelya. [Thermodynamic calculation of the engine]. Uchebnoye posobie. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1994, 39 p.
3. Trusov B. G. Modelirovaniye khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh. [Modeling of chemical and phase equilibria at high temperatures]. Moscow, BMSTU., Publ., 1991, 40 p.
4. DVIGATELI S5.92 I S5.221. RAZGONNYY BLOK «FREGAT». [ENGINES C5.92 and C5.221. "FRIGATE" SPACETUG] (InRuss.). Available at: ./main.php?id=53 (accessed 25.07.2022).
5. ZHRD RD-107 i RD-108 i ikh modifikatsii. [LRE RD-107 and RD-108 and their modifications] (In-Russ.). Available at: <http://www.lpre.de/energomash / RD-107/> (accessed 08.08.2018).

© Остапенко Д. В., Толстопятов М. И., 2022

УДК 621.7.04

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХКОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6**

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 вытяжкисферических деталей. Описывается процесс ротационной вытяжкикрупногабаритных элементов корпуса ракеты из алюминиевого сплава АМг6.*

*Ключевые слова: алюминиевый сплав АМг6, ротационная вытяжка,сферические детали.*

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF ROTATION EXTRUSION OF LARGE-SIZED  
SPHERICALROCKET BODY ELEMENTS FROM ALUMINUM ALLOY АМG6**

I. N. Pervova

Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC  
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 extrusionlarge-sized elements of the rocket body from an aluminum alloy АМG6 is described.*

*Keywords: aluminum alloy АМG6, 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 АМг6 при растяжении приведены в таблице [1, 2]:

**Химический состав и механические свойства сплава АМг6**

Химический состав, %										Механические свойства		
Al, не менее	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Прочие	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Остальное	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,6-6,8	0,2	–	0,02-0,1	0,03	274	127	12

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 АМг6 толщиной 22 мм.

По разработанной технологии предусматриваетсяустановка на оправке плоской листовой заготовки, представляющей собой круг диаметром около 3м с 6 отверстиями в центральной части для центрирования и фиксации, и далее применяется специальный способ обработки металлов давлением – ротационная вытяжка, для чего была спроектирована и изготовленаспециальная 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.

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 [3]. 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 [4], и введения их уточненных значений при испытаниях [5] был получен требуемый наружный контур детали (рис. 2).

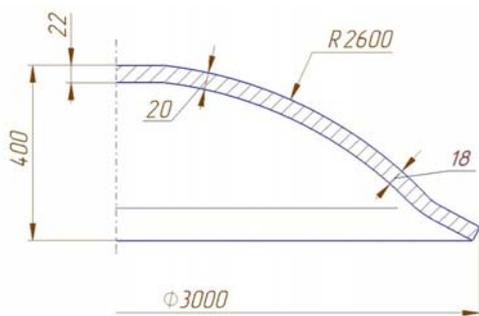


Рис. 1. Схема ротационной вытяжки:  
1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – ролик, 4 – прижим

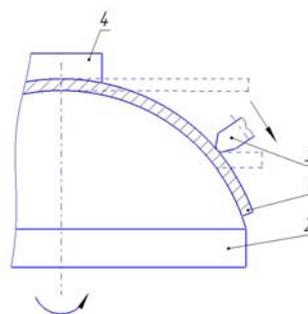


Рис. 2. Контур детали после ротационной вытяжки

Следующая наша цель – методом ротационной вытяжки из плоской заготовки получить деталь сферического профиля меньшей толщины и из других алюминиевых сплавов.

### Библиографические ссылки

1. ТУ 1-3-81–90. Технические условия. Плиты повышенного качества из алюминиевого сплава марки АМг6 с пониженным газосодержанием. М: Стандартинформ, 1990.
2. ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М: Стандартинформ, 2019.
3. Могильный, Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. М. : Машиностроение, 1983. 213 с.
4. ОСТ 92-1634–76. Вытяжка деталей ротационная. Типовые технологические процессы. М. : ГОНТИ-2, 1977.
5. Отчеты рабочей группы по ротационной вытяжке 10 заготовок детали 231.03.10.132 на УРС-3200. Красноярск, АО «Красмаш», 2022.

### References

1. TU1-3-81-90. Tekhnicheskie usloviya. Plity povyshennogo kachestva iz alyuminievogo splava marki АМg6М s ponizhennym gazosoderzhaniem. M: Standartinform, 1990.
2. GOST 4784-2019. Alyuminiy i splavy alyuminievye deformiruemye. M: Standartinform, 2002.
3. Mogil'ny N. I. Rotatsionnaya vytyazhka obolochkovykh detaley na stankah. M: Mashinostroenie, 1983. 213 s.
4. OST 92-1634-76. Vytyazhka detaley rotatsionnaya. Tipovye tehnologicheskie protsessy. M.: GONTI-2, 1977.
5. Otchyoty rabochey gruppy po rotatsionnoy vytazhke 10 zagotovok detail 231.03.10.132 na URS-3200. Krasnoyarsk, AO «Kras mash», 2022.

УДК 621.9.025

## ЗАТОЧКА СФЕРИЧЕСКОЙ БОРФРЕЗЫ

В. В. Раменский

АО «Красноярский Машиностроительный Завод»  
Российская Федерация, 660123, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 29  
Email: ramenskij99@mail.ru

*Изложены результаты производственных испытаний и определена рациональная геометрии режущей части борфрезы.*

*Ключевые слова: режущий инструмент, сферическая борфреза, форма заточки.*

## SHARPENING OF SPHERICAL BURR

V. V. Ramenskiy

Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
Email: ramenskij99@mail.ru

*The results of production tests are presented and the rational geometry of the cutting parts is determined.*

*Keywords: cutting tool, spherical burr, sharpening form.*

Доля обработки металлов резанием в настоящее время превышает 75 % всех выполняемых операций и оказывает решающее значение на темпы развития машиностроения. Качество готовых изделий прошедших механическую обработку напрямую зависит от качества инструмента. В связи с этим повышение качества инструмента является одним из приоритетных направлений развития машиностроения. Одним из путей повышения качества режущего инструмента является использование рациональной геометрии режущей части.

Для высокоскоростной чистовой обработки отверстий, пазов и поверхностей сложной формы из нержавеющей стали возможно использовать твердосплавные сферические борфрезы с диаметром режущей части от 2 до 16 мм и общей длиной от 11 до 110 по ГОСТ Р 52780–2007.

Сферическая борфреза (рис. 1) состоит из хвостовика и режущей части в виде шара с зубьями, выполненными в виде концентрических канавок [1], где все зубья сведены в центр режущей части (рис. 2). Недостатком такой заточки является отсутствие возможности вести обработку торцом режущей части [2, 3].

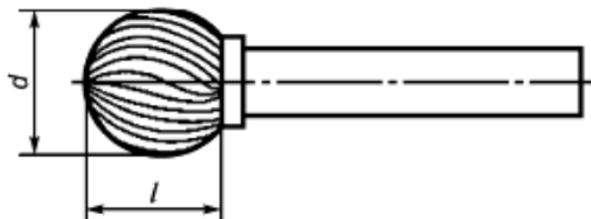


Рис. 1. Сферическая борфреза

В связи с этим проработан вариант заточки при котором 6 зубьев сведены в центр фрезы (выделены толстыми линиями), остальные зубья прилегают к режущей кромке фрезы рис. 3.

На основании проведенных производственных испытаний, изготовлены борфрезы со стандартной заточкой и предложенным вариантом. Обработка выполнялась вручную на бормашинке ПМ-34-150М с режимами обработки: частота вращения 8000 об/мин., подача 2–3 м/мин., прижимное усилие

5–11 кгс. Обработывался материал ХН59МВТКЮЛ ОСТ 92-1166-75. По результатам проведенных испытаний, установлено, что в обоих случаях износ по задней поверхности зубьев не превышает требований ГОСТ 52780–2007 (допустимый износ по задней поверхности зубьев до 0,5 мм). Дополнительно при работе борфрезой с предложенным вариантом заточки появилась возможность обработки торцем режущей части, что обусловлено особенностями заточки.

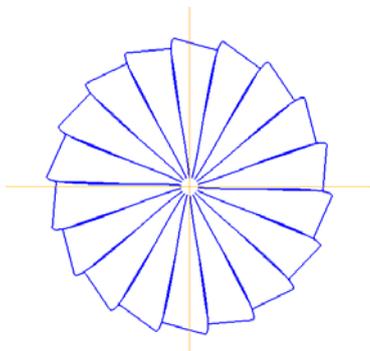


Рис. 2. Стандартный вариант заточки

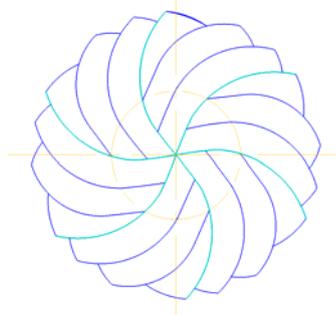


Рис. 3. Предложенный вариант заточки

Применение сферической борфрезы с предложенным вариантом заточки позволит увеличить производительность за счет уменьшения затрат времени и вести обработку в труднодоступных местах.

#### Библиографические ссылки

1. Справочник технолога-машиностроителя. Справочник: в 2-х т. Т.2 / А.Г. Косилова и Р.К. Мещерякова.; под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправил. и доп. – М.: Машиностроение. 2003. 944 с.
2. Попов С. А. Заточка и доводка режущего инструмента. М. : Высш. шк., 1986.
3. Режущий инструмент : учебное пособие / Д. В. Кожевников, В. А. Гречишников, С. В. Кирсанов; под общей редакцией С. В. Крисанова. – 5 изд., стереотип. Москва : Машиностроение, 2022. 520 с. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/192992> (дата обращения: 10.08.2022).

#### References

1. Handbook of a machine-building technologist. Handbook: in 2 vols. 2 / A.G. Kosilova and R.K. Meshcheryakova.; edited by A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakova. 5th ed., corrected. and additional. M.: Mechanical engineering. 2003– 944 p.
2. Popov S. A. Sharpening and finishing of cutting tools. M. : Higher School, 1986.
3. Cutting tool : textbook / D. V. Kozhevnikov, V. A. Grechishnikov, S. V. Kirsanov; under the general editorship of S. V. Krisanov. 5th ed., stereotype. Moscow : Mashinostroenie, 2022. – 520 p. Text : electronic // Lan : electronic library system. URL: <https://e.lanbook.com/book/192992> (accessed: 10.08.2022).

© Раменский В. В., 2022

УДК 629.7.062.3

## УЛУЧШЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТОВ РУЛЕВОГО ПРИВОДА РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Н. С. Рыжиков

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 29  
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: nikitos\_220998@bk.ru

*Рассматриваются научно-технические проблемы разработки рулевых приводов и систем управления летательными аппаратами. Основное внимание уделяется обеспечению оптимальных статических и динамических характеристик рулевых приводов.*

*Ключевые слова: рулевой привод, жидкостный ракетный двигатель, органы управления, система питания рулевых машин.*

## IMPROVEMENT OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ROCKET ENGINES STEERING DRIVE UNITS

N. S. Ryzhikov

Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nikitos\_220998@bk.ru

*Scientific and technical problems of the development of steering drives for aircraft control systems are considered. The main attention is paid to ensuring optimal static and dynamic characteristics of steering drives.*

*Keywords: steering drive, liquid rocket engine, controls, power system for steering machines.*

Управление движением любого летательного аппарата заключается в изменении условий полета, устранении возникающих отклонений от заданного режима. Управление включает в себя протекающие одновременно процессы организации движения по заданной траектории и процессы его стабилизации. Для этого применяют совокупность различных технических средств, представляющая собой систему управления. Неотъемлемые элементы этой системы – органы управления полетом, которые вместе с приводом входят в состав контура управления ракетой и являются его исполнительным звеном. Основное назначение органов управления – создание сил моментов для программного разворота стабилизации положения летательного аппарата.

В современных баллистических ракетах и космических ракетах-носителях широкое применение получили газодинамические органы управления. Принцип действия таких ОУ основан на изменении направления газовой струи, истекающей из сопла двигателя. К газодинамическим органам управления вектором тяги относятся поворотные двигатели, поворотные камеры двигателей, поворотные сопла, газовые рули, поворотные насадки сопел и т. д. [1].

Основные требования предъявляемые к органам управления:

- обеспечение потребных управляющих усилий при минимальных потерях тягово-импульсных характеристик ЖРД и РДТТ;
- минимальный эксцентриситет тяги, обусловленный работой ОУ;

- высокая конструктивная надежность и массовое совершенство;
- стабильность основных характеристик во время работы двигателя;
- возможность использования рулевых приводов минимальной мощности;
- простота компоновки на ЛА;
- технологичность и малые сроки отработки.

Функционирование любого ОУ предполагает угловые или линейные перемещения самого ОУ либо исполнительного элемента, сдвигающего его из нейтрального положения в прямом или обратном направлении. Общее правило, определяющее знак отклонения ОУ от нейтрального положения, состоит в следующем: отклонение ОУ от нейтрального положения считается положительным, если при этом образуется отрицательный управляющий момент. Соответственно, отклонение считается отрицательным, если приводит к появлению положительного управляющего момента. Знак управляющего момента определяется по правилу механики: проекция момента, приложенного к материальному телу, на направление, определяемое единичным вектором  $e^o$ , считается положительной, если она вызывает вращение тела вокруг данного вектора против часовой стрелки при условии, что это вращение наблюдается со стороны положительного направления вектора  $e^o$  [2].

При проектировании ОУ и определении мощности привода к нему необходимо знать максимальные управляющие моменты и силу. Для каждого из каналов управления (по тангажу, рысканию, крену) момент, создаваемый ОУ, выбирают таким образом, чтобы он обеспечивал стабилизацию и требуемый маневр ракеты. По назначению управляющего момента местоположению ОУ определяют управляющую силу, которую вычисляют для всей траектории. Полученные значения управляющей силы служат основой для выбора конструктивных параметров ОУ.

Управляющий момент складывается из двух составляющих: момента для стабилизации и момента для осуществления требуемого закона движения. Последний задают исходя из условий осуществления заданной полетной программы. Момент для стабилизации ракеты должен компенсировать возмущающие моменты, приложенные непосредственно к аппарату и вызванные действием таких случайных факторов, как ветер, погрешности изготовления и монтажа ракеты (технологические неточности, несимметричность компоновки, возмущений в момент разделения ступеней и т. д.). Источником возмущения могут быть отклонения значений параметров аппаратуры системы управления, приводящие к ошибкам в работе ОУ [3].

Если в управлении используют основной поворотный двигатель, то управляющую силу рассчитывают путем определения проекции тяги на рассматриваемое направление. Например, поворот основного двигателя с тягой  $P$  на угол  $\delta p$  создаст боковую управляющую силу

$$P_{ynp} = P \sin \delta p,$$

направленную по нормали к первоначальному положению продольной оси двигателя и действующую в плоскости угла поворота.

В приближенных расчетах при небольших углах поворота двигателя полагают, что тяги практически остается постоянной ( $P_k = P$ ), а управляющая сила изменяется линейно в зависимости от угла поворота ( $P_{ynp} = P \delta p$ ), при этом угол измеряется в радианах [4].

Рулевой привод ЛА представляет собой набор электрогидравлических и механических устройств, позволяющих с высоким быстродействием (время выхода на режим составляет менее 0.6 с.) и точностью (величина перерегулирования составляет не более 10%) развивать требуемые характеристики. Функционирование РП ЛА происходит в достаточно сложных условиях эксплуатации: воздействие вибрационных нагрузок, резкие воздействия при отстыковке ступеней ракеты, нелинейные характеристики сил трения тяг и качалок и сил инерции поворотного управляющего сопла с постоянно изменяющимся шарнирным моментом, сложные климатические условия и проблемы длительного хранения.

На рис. 1 представлен привод рулевой в составе отсека ракеты.

При работе рулевого привода, когда происходит разделение ступеней и запускается двигатель, рабочая жидкость от турбонасосного агрегата двигателя ракеты под давлением поступает в систему питания рулевых машин 2. Далее рабочая жидкость поступает на вход рулевых машин 1. Шток рулевой машины 1 по команде от системы управления ракеты выдвигается. Происходит соединение качалки 6 с корпусом 5 узла развязки и обеспечивается жесткая кинематическая связь между штоком рулевой машины и соплом двигателя ракеты.

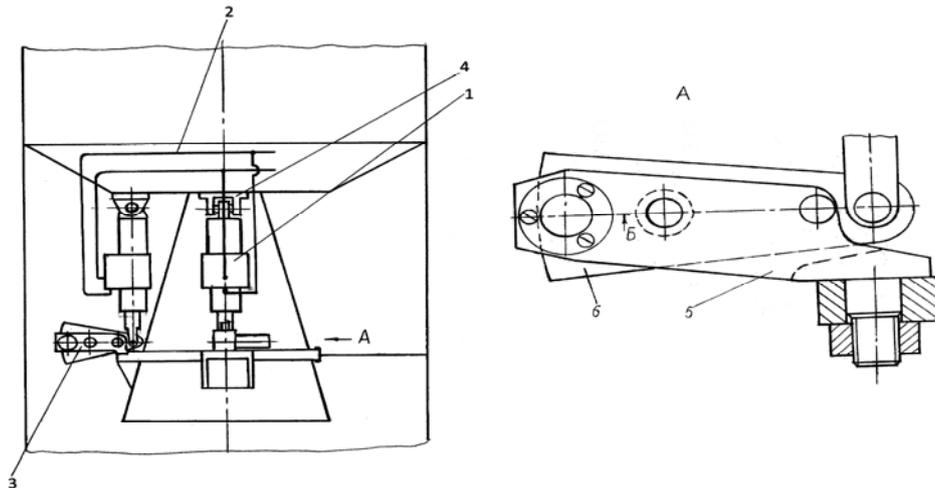


Схема рулевого привода:

1 – рулевые машины; 2 – системы питания рулевых машин; 3 – узлы развязки;  
4 – кронштейны закрепленные на днище топливного бака

Техническим результатом предлагаемой конструкции является улучшение точности фиксации рулевых машин в нулевом положении и повышение жесткости в передаче системы рулевой машины [5].

#### Библиографические ссылки

1. Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г. Управление космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1964. 402 с.
2. Проектирование и конструкция баллистических ракет и ракет-носителей: учеб. пособие / Н. А. Тестоедов, В.В. Кольга, Л.А. Семенова; под ред. Н. А. Тестоедова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 308 с.
3. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. М.: Энергия, 1966. 372 с.
4. Галлямов, Ш. Р. Исследование гидравлического рулевого привода летательного аппарата / Ш. Р. Галлямов, К. А. Широкова, В.А. Целищев, Д. В. Целищев // Вестник УГАТУ.-Уфа,2008.Т.11,№2(29) секция «Магшостроение, гидравлические машины, гидропневмоагрегаты». – С.66-74
5. <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/c126-2012-4-21/rulevye-privody-dlya-raket/>

#### References

1. Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г. Управление космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1964. 402 с.
2. Проектирование и конструкция баллистических ракет и ракет-носителей: учеб. пособие / Н. А. Тестоедов, В.В. Кольга, Л.А. Семенова; под ред. Н. А. Тестоедова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. – 308 с.
3. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. М.: Энергия, 1966. 372 с.
4. Галлямов, Ш. Р. Исследование гидравлического рулевого привода летательного аппарата / Ш. Р. Галлямов, К. А. Широкова, В.А. Целищев, Д. В. Целищев // Вестник УГАТУ.-Уфа,2008.Т.11,№2(29) секция «Магшостроение, гидравлические машины, гидропневмоагрегаты». С.66-74
5. <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/c126-2012-4-21/rulevye-privody-dlya-raket/>

© Ръжиков Н. С., 2022

УДК 621.785.5

## СВОЙСТВА ОДНОСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ПЛАЗМЕННО-АССИСТИРОВАННЫМ МЕТОДОМ\*

М. В. Савчук<sup>1</sup>, В.В. Денисов<sup>1</sup>, Ю.А. Денисова<sup>1</sup>, А.А. Леонов<sup>1</sup>, А.Б. Скосырский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук

Российская Федерация, 634055, Томская обл., г. Томск, пр-кт Академический 2/3

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

Российская Федерация, 634050, Томская обл., г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: \*mixail96@bk.ru

*В данной работе представлены триботехнические и физико-механические свойства однослойных и многослойных покрытий. Улучшение данных свойств приводит к улучшению износостойкости материала или изделия в целом. Также в работе представлены рентгенограммы в процессе нагрева образца до 1200°C.*

*Ключевые слова: вакуумно-дуговое напыление, многослойные покрытия, свойства покрытий*

## PROPERTIES OF SINGLE-LAYER AND MULTILAYER COATINGS PRODUCED BY THE VACUUM-ARC PLASMA-ASSISTED METHOD

M. V. Savchuk<sup>1</sup>, V. V. Denisov<sup>1</sup>, Yu. A. Denisova<sup>1</sup>, A.A. Leonov<sup>1</sup>, A.B. Skosyrsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of High Current Electronics Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
2/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University

36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

E-mail: \*mixail96@bk.ru

*This paper presents the tribological and physical-mechanical properties of single-layer and multilayer coatings. The improvement of these properties leads to an improvement in the wear resistance of the material or the product as a whole. The paper also presents X-ray patterns in the process of heating the sample to 1200°C.*

*Keywords: vacuum arc deposition, multilayer coatings, coating properties*

**Введение.** Повышение износостойкости материалов и изделий является важной задачей научно-технического развития России. Материалы и изделия с повышенной износостойкостью могут найти свое применение в таких областях промышленности, как: машиностроение, авиационная и инструментальная промышленность. Достигается улучшение износостойкости изделий путем напыления различных тонкопленочных покрытий [1-3]. В данной работе используется метод вакуумно-дугового плазменно-ассистированного [4] осаждения функциональных покрытий. В процессе вакуумно-дугового напыления, упрочняющее покрытие на поверхности изделия образуется в результате эрозии катода.

В процессе работы поверхность большинства режущих инструментов и деталей машин подвергается окислительному износу вследствие локального разогрева [5]. В связи с этим, напыляемые по-

---

\* Исследование триботехнических и физико-механических свойств выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

Исследование рентгенограмм было выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия №1.1.14.

крытия, которые наносятся на изделия, подверженные термическому воздействию, должны обладать термической стойкостью, чтобы избежать окисления покрытия (рис. 1–3).

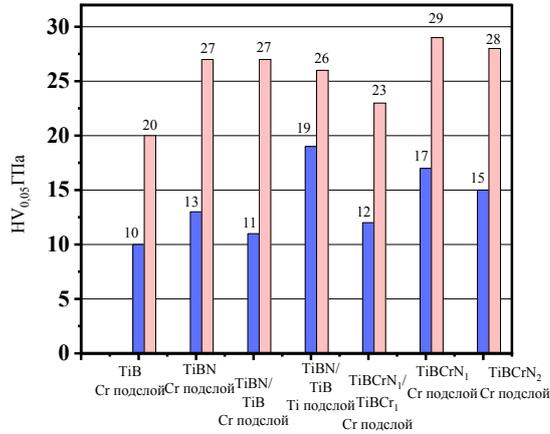


Рис. 1. Микротвердость системы покрытие/подложка (сталь Х12МФ и твердый сплав ВК8)

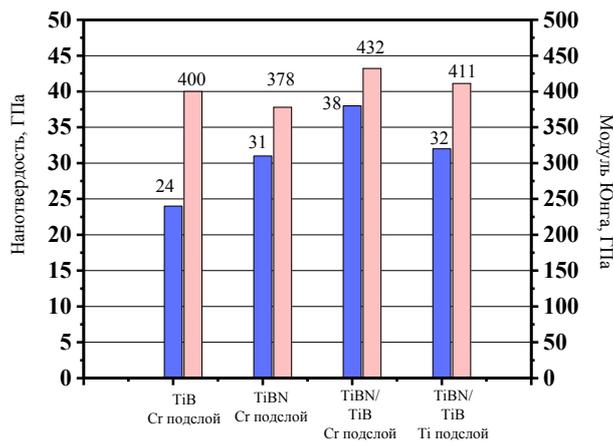


Рис. 2. Нанотвердость и модуль Юнга покрытий

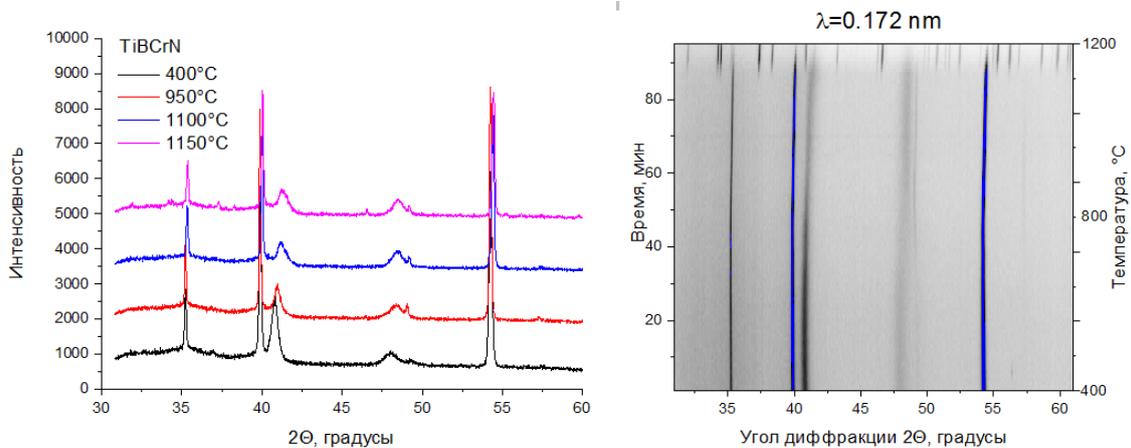


Рис. 3. Серия рентгенограмм образца покрытия TiBCrN/WC в процессе нагрева на воздухе в представлении проекции интенсивности на плоскость «угол дифракции – температура»

### Библиографические ссылки

1. Филиппов А.В., Шамарин Н.Н., Москвичев Е.Н. и др. // *Обраб. метал.*, **24**(1), 87, 2022; DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102
2. Денисов В.В., Денисова Ю.А., Варданын Э.Л. и др. // *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(1), 125, 2021; DOI: 10.17223/00213411/64/1/125
3. Верещака А.С., Верещака А.А. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. – № 9. – С. 9-18.
4. Денисов В.В., Денисова Ю.А., Варданын Э.Л. и др. // *Изв. вузов. Физика*. – 2021. – Т. 64. – № 1. – С. 125-129. DOI: 10.17223/00213411/64/1/125
5. Савостиков В.М., Денисова Ю.А., Денисов В.В. и др. // *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(12), 43, 2021; DOI: 10.17223/00213411/64/12/43

### References

1. Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N. and others // *Obrab. Metal.*, **24**(1), 87, 2022; DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102
2. Denisov V.V., Denisova Yu. A., Vardanyan E.L. and others // *Izv. vyssh. учеб. zaved. Fizika*, **64**(1), 125, 2021; DOI: 10.17223/00213411/64/1/125
3. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. // *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. – 2005. – № 9. – S. 9-18.
4. Denisov V.V., Denisova YU.A., Vardanyan E.L. and others // *Izv. vuzov. Fizika*. – 2021. – T. 64. – № 1. – S. 125-129. DOI: 10.17223/00213411/64/1/125
5. Savostikov V.M., Denisova YU.A., Denisov V.V. and others. // *Izv. vyssh. учеб. zaved. Fizika*, **64**(12), 43, 2021; DOI: 10.17223/00213411/64/12/43

© Савчук М. В., Денисов В. В., Денисова Ю. А., Леонов А. А., Скосырский А. Б., 2022

УДК 621.793.7

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ  
ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ И МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
МЕТОДАМИ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

А. Н. Смирнов<sup>1\*</sup>, А. Ю. Дюкарев<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: mcray\_san@list.ru

*Повышение функциональных и эксплуатационных характеристик узлов ракетно-космической техники путем создания и модифицирования поверхностных слоев. Разработаны технологические процессы получения новых покрытий плазменным напылением, химико-термической обработкой поверхности и осаждением в вакууме.*

*Ключевые слова: плазменные покрытия, напыление, напыление в вакууме.*

**IMPROVING THE PERFORMANCE OF PARTS OF MOVABLE INTERFACES  
BY CREATING AND MODIFYING SURFACE LAYERS USING  
COMBINED TECHNOLOGIES**

A N. Smirnov<sup>1\*</sup>, A. Yu. Dyukarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC

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: mcray\_san@list.ru

*Improving the functional and operational characteristics of rocket and space technology units by creating and modifying surface layers. Technological processes for obtaining new coating by plasma spraying, chemical-thermal surface treatment and vacuum deposition have been developed.*

*Keywords: plasma coating, sputtering, spraying in vacuum.*

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.

В тяжелых условиях эксплуатации стойкость поверхностных слоев подвижных соединений против тепловых, механических нагрузок оказывается недостаточной. Поэтому возрастает интерес к проблеме создания защитных покрытий, разработке и практическому применению технологий их нанесения [1].

Покрытия, наносимые на рабочие поверхности деталей, определяют технические и эксплуатационные характеристики конструкций летательных аппаратов, технологического оборудования и др. Эффективными методами, обеспечивающими высокие эксплуатационные свойства узлов и деталей специализированных машин, являются различные способы нанесения теплозащитных, износостойких, коррозионностойких и др. покрытий.

В производстве ракетно-космической техники применяют защитные покрытия из оксида алюминия для обеспечения надёжной работы изделий в условиях действия циклически изменяющиеся тер-

мических нагрузок. Оксид алюминия или двуокись циркония наносят на головные обтекатели ракет, камеры сгорания и сопла ракетных двигателей [2].

Для нанесения покрытий плазменным методом разработан комплекс технологического оборудования. В состав комплекса входит: источник питания (УПР-201УЗ); пульт управления с контрольно-измерительными и регулируемыми приборами (см. рисунок), устройством для поджига дуги и системой блокировки при аварийных ситуациях; плазменный распылитель ПКП-1; дозирующее устройство аэрационного типа; система газо- и водоснабжения; сканирующее устройство для перемещения плазмотрона в зоне напыления; камера для напыления.

Отличительной особенностью установки является плазменный распылитель с осевой фокусированной подачей порошковых материалов и дозирующее устройство, которые соединены в единый блок (см. рисунок). Такая компоновка обеспечивает транспортировку порошковых материалов по кратчайшему пути в прикатодную область плазмотрона и минимизирует сепарацию пылегазовой смеси [3].



Плазмотрон ПКП-1 с осевой подачей порошка

Для получения качественного покрытия был подготовлен порошок дисперсностью 10-80 мкм состава Ni и Ti (45 %). Кроме того, качество покрытия и ресурс работы изделия зависят от материалов, используемых для получения подслоя.

Наиболее распространенными материалами, применяемыми в качестве подслоя, являются молибден, сплавы на никелевой основе, содержащие в своем составе алюминий, образующих прочные химические связи в результате их взаимодействия с подложкой. Весьма перспективно напыление композиционным порошком (никель – алюминий), каждая частица которого состоит из алюминия, окруженного никелевой оболочкой. При напылении в результате алюминотермической реакции образуется покрытие – алюминид никеля, отличающийся высокой стойкостью к окислению и более высокой температурой плавления (1640 °С), чем составляющие его металла.

Материал, напыляемый в качестве подслоя, выбирается в зависимости от материала покрытия, материала подложки, и условий его эксплуатации. Толщина промежуточного слоя составляет 0,05–0,15 мм [4].

В качестве основного плазмообразующего газа используется аргон и в виде добавок 5–10% водорода.

Для улучшения сцепления напыленных покрытий с подложкой и уменьшения пористости иногда проводится операция оплавления поверхности. Для последующего оплавления пригодны те напыленные сплавы, которые обладают способностью самофлюсования. Оплавление таких покрытий проводят при температуре, соответствующей диапазону кристаллизации сплавов этой системы, в присутствии жидкой и твердой фаз. При нагреве таких покрытий до температур 950°-1100 °С происходит их оплавление, бор и кремний частично переходят в В2Оз и SiO2. Обработанные таким образом покрытия характеризуются высокой твердостью и прочностью сцепления [5].

Исследования трения в среде абразива образцов без покрытия и с покрытием показали, что износостойкость стального образца по твердосплавному покрытию уменьшилась на порядок и составила  $1,05 \cdot 10^{-7}$ , а износ твердосплавного покрытия на 2 порядка меньше износа стального образца.

На микрофотографиях отчетливо видна ячеистая структура плазменного покрытия. В зазоры между частицами напыленного покрытия попадают и заклиниваются абразивные частицы. В начальный

момент трения эти частицы могут обладать режущими свойствами, но затем, после скругления, пластически оттесняют материал контртела.

На стальном образце видны полосы и царапины, оставленные на поверхности абразивными частицами. Поверхность трения стального образца не имеет видимых следов задира и схватывания поверхности. Поверхность гладкая, темного цвета, с шероховатостью 0,32...1,25 мкм. Такой вид поверхности трения характерен для нормального протекания окислительного износа.

Результаты предварительных исследований износостойкости напыленных плазменных твердосплавных покрытий убедительно показывают преимущество их в тяжелых условиях трения в абразивной среде.

Созданы новые металлокерамические и комбинированные покрытия с повышенными антифрикционными и противоизносными свойствами, способные работать в экстремальных условиях, без смазочного материала, а также в вакууме.

Полученные покрытия возможно применять для деталей оборудования, предназначенного для изготовления ракетно-космической техники, с целью улучшения их износостойких характеристик, а в следствии и сохранения их геометрических параметров для стабильной работы механизмов.

### Библиографические ссылки

1. Повышение качества поверхности и плакирование металлов: справочное издание. / Под ред. Кнаушнера А. М.: Металлургия, 1989. С. 368.
2. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
3. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технологии, оборудование. / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. М.: Металлургия, 1989. С. 432.
4. Получение компактной металлизационной струи при плазменном напылении / Коваленко Г.Д., Рогожин В.М. ФиХОМ, 1977. № 6.
5. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. М.: Машиностроение, 1966. 434 С.

### Reference

1. *Povishenie kachestva poverhnosti I plakirovaniya metallov* [Improving the quality of the surface and cladding of metals]. / Red. Knaushner A. M.; Metallurgy, 1989. 368 p. (In Russ.). Drozdov YU. N., *Trenie I iznos v ekstremalnih usloviyah* [Friction and wear under extreme conditions]: Directory / YU.N.
2. Drozdov, V. G, Pavlov, V.N. Puchkov. M.: Mechanical engineering, 1986. 224 p (In Russ.).
3. Kudinov V. V. *Nanesenie pokritii napyleniem. Teorii, tehnologii, oborudovanie*. [Spray coating. Theory, technology, equipment.]. M.: Metallurgy, 1989. 368 p. (In Russ.).
4. *Poluchenie kompaktnoi metalizatsionnoy strui pri plazmennom napylenii* [Obtaining a compact metalization jet during plasma spraying] / Kovalenko G.D., Rogozhin V.M. FiHOM, 1977. №6. (In Russ).
5. Krechmar. E. *Napilenie metallov, keramiki I plastmass*. [Spraying of metals, ceramics and plastics].M; Mechanical engineering. 1966.. 434 p. (In Russ).

© Смирнов А. Н., Дюкарев А. Ю., 2022

УДК 678

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ФТОРОПЛАСТОВ)

В. С. Сызганов, В. В. Мерзляков

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
 Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
 E-mail: kras@krasmail.ru

*Рассматривается способ изготовления деталей из полимерных материалов с помощью аддитивных технологий.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, фторопласт, полимерные материалы.*

## APPLICATION ADDITIVE TECHNOLOGY FOR PRODUCTS FROM POLYMERIC MATERIALS (FTOROPLAST)

V. S. Syzganov, V. V. Merzlyakov

Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC  
 29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
 E-mail: kras@krasmail.ru

*The way of production of details from polymeric materials by means of additive technologies is considered.*

*Keywords: additive technologies, ftoroplast, polymeric materials.*

В изделиях ракетно-космической техники широко применяются ДСЕ, выполненные из полимерных материалов, в том числе из фторопласта.

Физическо-химические свойства фторопласта-4 (Политетрафторэтилен; фторлон-4; фторлон)  $[-CF_2CF_2-]_n$ . Белое и сероватое полупрозрачное в тонком слое твердое вещество со скользкой поверхностью. Плотн. 2,15-2,24; т. пл. 327°;  $n^{25}=1,375$ . По химической стойкости превосходит благородные металлы [1].

К особенностям изготовления деталей из фторопласта относятся: технология изготовления тонкостенных мелких деталей, специализированное оборудование, воздушное охлаждение, специальный режущий инструмент, использование большого количества оснастки, важен опыт оператора по работе с полимерными материалами. Пример изделия из фторопласта представлен на (рис. 1).

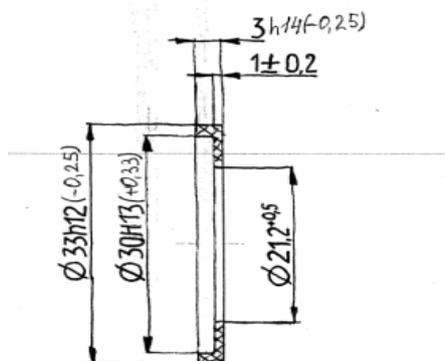


Рис. 1. Пример изделия из фторопласта

Написание управляющих программ и их корректировка требует много времени из-за необходимости ручного редактирования программы в виду особенностей изготовления деталей.

Для решения выявленных проблем, предлагается изготавливать детали из полимерных материалов с помощью аддитивных технологий на 3D-принтере. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Подобрать необходимый материал, позволяющий изготовить деталь с необходимыми физико-химическими свойствами в установленные сроки, при этом обеспечить соблюдение необходимой шероховатости поверхности и других требований КД.

2. Разработать и отработать технологию с учетом выбранного материала для изготовления детали с помощью 3D принтера.

На данный момент состояние развития аддитивных технологий на основе двадцатилетней статистики [2] представлено на диаграмме (рис. 2).

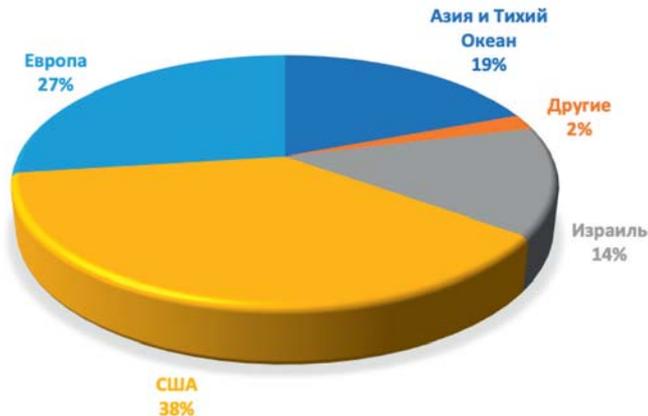


Рис. 2. Структура рынка АТ по странам на 2020 г. [2]

Рынок АТ в России составляет 0,5% от мирового, равного \$12,8 млрд долларов [3] Отрасль аддитивных технологий в России в 2010–2020 годах показала положительную динамику развития и достигла следующих показателей в 2020 году:

- объем российского рынка аддитивных технологий (аддитивного оборудования и комплектующих, материалов для аддитивной печати, услуг и программного обеспечения) – 3 560 млн рублей;
- объем российского рынка аддитивного оборудования и комплектующих – 2 053,8 млн рублей;
- объем продаж российских компаний на внутреннем рынке аддитивного оборудования и комплектующих – 804,3 млн рублей;
- объем продаж российских компаний на внешнем рынке аддитивного оборудования и комплектующих – 40,3 млн рублей [4].

#### Библиографические ссылки

1. Шефтель В. О. Полимерные материалы (технологические свойства). Справочник П. Химия. 1982 – 232 с.
2. <https://wohlersassociates.com/>
3. <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=199520>
4. <http://static.government.ru/media/files/ogvdrJAZZEx7roHJAZwVEGZw6yTxBaJu>

#### References

1. Sheftel V. O. Polymeric materials (technological properties). Sparavochnik P. Himiya. 1982 – 232 pages.
2. <https://wohlersassociates.com/>
3. <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=199520>
4. <http://static.government.ru/media/files/ogvdrJAZZEx7roHJAZwVEGZw6yTxBaJu>

© Сызганов В. С., Мерзляков В. В., 2022

УДК 629

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРУЕМЫХ УЗЛОВ В АГРЕГАТЕ ГИБКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

С. В. Титенков<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, Красноярск, проспект имени газеты «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: Titenkov-sv@mail.ru

*В статье рассмотрены перспективные, используемые на данный момент, механические агрегаты и технологии, которые могут быть использованы в агрегате гибки для специальных тонкостенных труб аэрокосмической отрасли.*

*Ключевые слова: специальные узлы для гибки труб, технологии двойного назначения.*

## USING SPECIAL UNITS IN A THIN-WALLED PIPE BENDING MACHINE

S. V. Titenkov<sup>1</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC

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: VZ@sibsau.ru

*The article discusses promising currently used mechanical units and technologies that can be used in a bending device for special thin-walled pipes in the aerospace industry.*

*Keywords: special machines for pipe bending, dual-use technologies.*

Всегда, при научно-техническом развитии техники и технологий использовался метод взаимодействия тех или иных успешных технических решений из параллельных отраслей для решения стоящих технических задач. Отражением ранее используемого взаимодействия является использование в настоящий момент в аэрокосмической отрасли стандартов и нормативных документов отраслей: авиационной, судостроительной, железнодорожной и т. п. Безусловно перечисленные отрасли существенно функционально отличаются друг от друга и у данных отраслей разные требования к надёжности, прочности, материалоемкости, коррозионостойкости, возможности повторного использования и срокам эксплуатации. Однако базовые принципы того или иного успешного технического решения вышеуказанных отраслей могут быть применены и в аэрокосмической отрасли с доработкой в нужном виде и под конкретно стоящие задачи.

Например, в сантехнической отрасли при ремонте или замене труб отопления для гибки труб нагревают участок, который хотят согнуть. Однако для тонкостенных труб, применяемых в аэрокосмической отрасли, нагрев будет приводить к искривлению трубы при её гибке. Фактор искривления можно исправить путём использования внутри трубы пружины из более жаростойкого металла или композитного материала. В итоге пружина с диаметром внутренней трубы будет служить своеобразным дорном, не позволяющим деформироваться внутреннему участку трубы и будет обеспечивать равномерное распределение нагрузки по площади местагиба. Преимущество использования жаростойкой пружины вместо промышленного дорна (элемента инструментальной оснастки, который в процессе гибки трубы находится внутри трубы и защищает трубу от искривлений) заключается в длине участка трубы, которую она может захватить. Дорновую гибку можно использовать, если длина сгибаемого участка трубы до 70 ÷ 80 мм и не более. Для гибки тонкостенных труб на всей длине (со стандартной длиной ≈ 6000 мм) дорн использовать невозможно, а вот жаростойкую пружину можно [1÷5]. При этом, в отличие от дорогостоящего промышленного дорна (в большинстве случаев иностранного производства), который периодически требуется заменять, ресурс использования жаростойкой пружины может превысить несколько десятков раз ресурс использования дорна.

При этом, при изгибе трубы можно нагревать не саму трубу, а именно жаростойкую пружину, с помощью чего изменится пластичность трубы и облегчится её гибка. Нужно учесть, что у медных или алюминиевых труб относительно удлинение составляет от 50 % до 20 %, а вот у стальных труб не более 15 %, поэтому для защиты поверхности стальных труб от деформации в виде трещин при изгибе можно использовать масляное покрытие или мыльную суспензию. На месте вышеназванного покрытия производят незначительный нагрев или без нагрева выполняют гибку.

Стоит обратить внимание на технологию теплового воздействия электрического тока на металл трубы. Данное явление уже используется в нагревательных приборах: электрочайниках, кипятильниках, обогревателях и электроплитках. При этом, выделяемое на участке цепи количество теплоты зависит от приложенного к этому участку напряжения, значения протекающего тока и от времени его протекания (Закон Джоуля-Ленца). Преобразовав закон для участка цепи, можно для вычисления количества нужной теплоты использовать либо напряжение, либо силу тока, но тогда обязательно нужно знать и сопротивление цепи (зависит от марки материала металла), ведь именно оно ограничивает ток и вызывает по сути нагрев материала трубы.

Согласно анализа рассмотренных технических решений и требований учёта использования параметров энергоёмкости и экономичности в конструкции агрегата гибки тонкостенных труб можно использовать технологию применения внутри трубы пружины из композитного материала при холодной гибке труб.

### Библиографические ссылки

1. Никишев А. А., Титенков С. В., Запорожский А. С. 3D-моделирование при проектировании пространственных трубопроводных систем // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич.систем акад. М.Ф.Решетнева: в 2 ч. ; под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., Красноярск, 2013. Ч.1 с.328-330.
2. Титенков С.В., Журавлев В.Ю. Алгоритм проектирования модели трубопровода сложной конфигурации для станка трубогиба // Решетневские чтения: материалы XXII Междунар. науч. конф.: в 2ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2018. Ч. 1, с.217-219.
3. 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.
4. 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
5. 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.

### References

1. Nikishev A. A., Titenkov S. V., Zaporozhsky A. S. 3D modelirovanie pri proektirovanii prostranstvennih truboprovodnih sistem [3D-simulation at designing space pipeline systems]. Reshetnevsky readings : materials of the XVII Intern. scientific. cohf. consecrated memory gener. rocket designer. – space acad. M.F.Reshetnev: 2 parts ; under the general editorship of Y. Y. Loginov; Sib. state aerospace. univ., Krasnoyarsk, 2013. Part 1, p. 328-330.
2. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Algoritm proyektirovaniya modeli truboprovoda slozhnoy konfiguratsii dlya stanka [Algorithm for designing a pipeline model of complex configuration for a machine]. Reshetnevsky readings: materials of the XXII Intern. scientific. cohf.: 2 parts ; under the general editorship of Y. Y. Loginov; Sib. state univ., Krasnoyarsk, 2018, Part 1, p. 217-219.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

УДК 629.7.036.54.063.6:621.565.93/.94

**К ВОПРОСУ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

А. С. Торгашин

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
 Российская Федерация, 660123, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 29  
 Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
 E-mail: ttarg23@yandex.ru

*Рассматривается метод анализа ряда данных кавитационных испытаний ТНА ЖРД.*

*Ключевые слова: ЖРД, насос, кавитация.*

**TO THE ISSUE OF APPROXIMATION OF TEST DATA**

A. S. Torgashin

Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC  
 29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
 Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: ttarg23@yandex.ru

*The method for analyzing a series of data from cavitation tests of HPL LPRE is consider.*

*Keywords: LPRE, pump, cavitation.*

Одним из наиболее ответственных и энергонапряженных узлов жидкостного ракетного двигателя является турбонасосный агрегат (ТНА), необходимый для обеспечения непрерывной подачи компонентов топлива в камеру двигателя с заданным расходом и давлением. К ТНА, как к агрегату жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), предъявляются следующие требования:

-обеспечение работоспособности и основных параметров при заданном ресурсе с необходимыми возможными паузами установленной продолжительности.

-обеспечение на всех режимах работы двигателя, подачи компонентов топлива требуемого расхода и давления при высокой степени надежности с приемлемым КПД всего агрегата и минимальной стоимости изготовления.

-обеспечение минимальных размеров и массы всей двигательной установки (ДУ) за счет наименьших габаритных размеров и массы самого ТНА.

При работе ТНА, в насосе может возникнуть явление кавитации, отрицательно влияющее на выполнение указанных выше требований. Кавитацией называют процесс роста пузырька в жидкости вследствие динамического понижения давления до давления насыщенного пара, происходящий при постоянной температуре [1]. Обычно данные испытаний записываются в виде зависимости напора по оси  $Y$ , выраженного в метрах или в Дж/кг, к давлению на входе по оси  $X$ , выраженному в Па или кгс/см<sup>2</sup>. Для возможности сравнения показаний кавитационных испытаний с аналогичными показаниями других насосов, а также определения функции, необходимо привести значения к безразмерным коэффициентам. Для оси  $X$  можно использовать число кавитации  $\sigma$  [2] записанное в следующем виде:

$$\sigma = \frac{2(P_{gx} - P_v)}{\rho * v_{гх\text{ср}}^2}, \quad (1)$$

где  $P_{gx}$  – давление на входе в МПа,  $P_v$  – давление насыщенного пара в МПа,  $\rho$  – плотность жидкости в кг/м<sup>3</sup>. Для оси  $Y$  можно использовать коэффициент напора  $\Psi$  (англ. headcoefficient):

$$\Psi = 2 * g * \frac{H}{v_2^2}, \quad (2)$$

где  $H$  – полный напор насоса в м,  $v_2$  – скорость на выходе из насоса в м/с<sup>2</sup>.

Для определения точек промахов применяют один из критериев статистической теории, например критерий Шовене или Пирса, основанный на распределении Гаусса. В случае критерия Шовене опре-

деляется число стандартных отклонений с учетом всех результатов, в том числе и потенциальных промахов, а затем сравнивается с вероятностью повторения данного события. Значение вероятности определяется с помощью распределения Гаусса. Для точного определения промахов в применении к кавитационным испытаниям, необходимо разбить все точки, снимаемые при испытании, на группы по значениям в зависимости от давления на входе.

Для определения функции, ее характера (линейная, степенная, логарифмическая и т. д.), необходимо воспользоваться одним из методов математического анализа – аппроксимацией. Для аппроксимации полученных результатов с целью получения зависимости воспользуемся методом наименьших квадратов [3]. Метод заключается в рассмотрении суммы квадратов разностей  $y_i$ , полученных при кавитационном испытании и аппроксимирующей функции  $\varphi(x)$  в соответствующих точках. Параметры функции  $a, b, c \dots \varphi(x)$  подбираются так, чтобы разность в квадрате была наименьшей. В зависимости от вида функции: линейная вида  $y=ax+b$ , трехчлена второй степени  $y=ax^2+bx+c$  и т. д. различаются системы линейных уравнений, необходимых для получения неизвестных  $a, b, c$ . В случае аппроксимации логарифмической функцией, зависимость задается в виде:  $F(x)=a+b*\ln(x)$ . В случае аппроксимации экспоненциальной функцией, зависимость задается в виде:  $F(x)=a*e^{b*x}$ . Учитывая данные кавитационных испытаний, наиболее близкие показания аппроксимации и значений испытаний насоса в режиме кавитации показывает степенная функция. Несмотря на достаточное точное приближение аппроксимирующей функции данных испытаний (погрешность до 0,97% при сравнении аппроксимации и средних значений испытаний) если сравнивать аппроксимирующее уравнение со значениями каждого испытания по отдельности, то максимальная относительная погрешность может достигать значений до 4,59%. Для еще более точного приближения функции к данным испытаний, предлагается использовать метод интерполяции функций при помощи алгебраических многочленов (полиномиальная интерполяция). Например, интерполяционной формулой Ньютона для неравных промежутков [4]. Данная формула является видоизмененной формулой Лагранжа и в общем виде ее можно записать:

$$f(x) = B_1 + (x - x_1)B_2 + (x - x_1)(x - x_2)B_3 + \dots + (x - x_1) \dots (x - x_{n-1})B_n. \quad (3)$$

В случае применения интерполяции номинальных значений давления на входе (первых точек, снимаемых на графике), максимальная относительная погрешность, при сравнении полученной функции с каждым графиком испытаний по отдельности, не превышает значений 1,9%. Преимущественно, погрешность будет находиться в пределах 1 % для большинства точек данных испытаний.

Для дальнейшей работы, необходимо уточнить коэффициент функции с целью увеличения диапазона охвата значений  $\sigma$  и  $\Psi$ , а также увеличения точности приближения. Коэффициенты можно уточнить, применяя для функции как данные кавитационных испытаний других насосов (особенно в данной части интересно приближение функции к результатам испытаний других высоконапорных насосов, характерных для ТНА), так и применяя другие методы интерполяции и аппроксимации коэффициентов и функции. Таким образом, полученный способ позволит проводить анализ кавитационных свойств центробежного насоса с целью улучшения антикавитационных качеств ТНА.

#### Библиографические ссылки

1. Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло. Струи, следы и каверны : пер. с англ. под ред. Г. Ю. Степанова. М.: Мир, 1964, 466 с.
2. Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. Кавитация. Перевод с английского под ред. В. И. Полежаева М.: Мир, 1974, 688 с.
3. В. И. Петров, В. Ф. Чебаевский. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. – М. : Машиностроение, 1982. – 192 с
4. Березин И.С., Жидков Н.П., Методы вычислений. Том первый. М.: Государственное издательство математической литературы, 1962. 464 с.

#### References

1. Birkhof, E. Sarantonello. Strui, sledyikaverny. Perevod s anglijskogo pod red. G. YU. Stepanova. M.: Mir, 1964, 466s.
2. R. Knepp, Dzh. Dejli, F. Hemmit. Kavitaciya. Perevod s anglijskogo pod red. V. I. Polezhaeva M.: Mir, 1974, 688 s.
3. Piskunov N.S. Differencial'noeiintegral'noeischisleniedlyavtuzov, t. 1: Uchebnoeposobiedlyavtuzov. – 13-e izd.- M.: Nauka, 1985.-432 s.
4. Berezin I.S., ZHidkov N.P., Metodyvychislenij. Tom pervyj. M.: Gosudarstvennoeizdatel'stvomatematicheskopoliteratury, 1962. 464 s.

УДК 67.02

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л. С. Удод, Н. В. Мезенцева

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М.Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: liludallaz@gmail.com

*Отработана технология соединения полимерных композиционных материалов с материалами с более высоким значением коэффициента линейного теплового расширения, применяемых в вытравливаемых оправках при изготовлении силовых конструкций космических аппаратов.*

*Ключевые слова: соединение материалов, вытравливаемые оправки, композиционные материалы.*

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR JOINING POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

L. S. Udod, N. V. Mezentseva

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: liludallaz@gmail.com

*A technology has been developed for joining polymer composite materials with materials with a higher linear thermal expansion coefficient used in etched mandrels in the manufacture of load-bearing structures of spacecraft.*

*Key words: connection of materials, etched mandrels, composite materials.*

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в ракетно-космической отрасли позволяет поднять на качественно новый уровень характеристики создаваемых изделий, увеличить их надежность, срок службы, снизить материалоемкость.

В настоящее время все большее значение приобретают высокомодульные и высокопрочные материалы на основе углеродных волокон. Благодаря основному преимуществу ПКМ перед металлами – высокими удельной прочностью и модулю упругости при значительно меньшей плотности [1], наблюдается неизменная тенденция – замена различных элементов конструкции из металлов на элементы из разнообразных композиционных материалов. Данная тенденция связана с повышением экологических норм и, соответственно, экономической эффективности изделий. Это позволяет широко применять ПКМ в авиационной, ракетно-космической, автомобильной, судостроительной, химической, станкостроительной, электротехнической, строительной и других отраслях современной промышленности [2-3].

В авиационной и ракетно-космической отраслях, предъявляющих наиболее жесткие требования к качеству изделий, преимущественно применяются ПКМ на основе эпоксидной смолы, наполненные стеклянными, органическими и углеродными волокнами. Из них изготавливают как второстепенные, не нагруженные элементы конструкций, так и высоконагруженные конструкционные узлы [4], а их количество, применяемое в конструкции современных космических аппаратов, колеблется от 35 до 70%.

Сравнение характеристик однонаправленных композитов при растяжении вдоль волокон показывает, что наибольшей удельной прочностью обладают органопластики, а угле- и боропластики значительно превосходят стекло- и органопластики по удельной жесткости [5-6].

Свойства ПКМ, армированных различными тканями и пропитанных разными связующими, зависят от большого числа факторов и в первую очередь характеризуются:

- Составом, формой, длиной, диаметром армирующих волокон и способом подготовки их поверхности;
- Объемным содержанием армирующего наполнителя и связующего;
- Качеством пропитки армирующего наполнителя связующим;
- Свойствами связующего и прочностью его связи с наполнителем;
- Технологией изготовления ПКМ;
- Взаимным расположением армирующего наполнителя в изделии (схемой армирования) [7].

В АО «ИСС» освоена и внедрена технология изготовления деталей из полимерных композиционных материалов на вытравляемых оправках. Детали из ПКМ на вытравляемых оправках изготавливаются из препрега на основе углеродного наполнителя (углеродной ткани), пропитанного эпокси-фенольным связующим. Препрег вручную выкладывается на оснастку с последующим проведением полимеризации ПКМ по температурно-временному режиму вакуумно-автоклавного формования. По результатам изготовления крупногабаритных деталей замкнутого контура, выявлено, что после проведения полимеризации возникает частичный неконтролируемый отрыв композиционного материала от поверхности алюминиевой оснастки. Для улучшения адгезии препрега к оснастке проводится подготовка поверхности оснастки.

Процесс подготовки поверхности алюминиевой оснастки под выкладку является трудоемким, так как выполняется вручную: зачистка поверхности, нанесение рисок. Недостатком такой подготовки является наличие рисок на оснастке, которое приводит к образованию во внутренней полости детали из ПКМ большого количества частиц заполимеризованного связующего, размер частиц соразмерен с размерами рисок, на металле оправки. Образование частиц происходит в результате проникновения связующего в риски в процессе полимеризации ПКМ.

Одновременное применение в конструкции детали материалов с большой разницей коэффициентов линейного теплового расширения (КЛТР) приводит к расслоению поверхностей при воздействии высоких температур (максимальная температура полимеризации углепластиков на основе эпокси-фенольных связующих достигает  $190 \pm 5$  °С).

Проблема соединения поверхностей из ПКМ с металлическими поверхностями достаточно широко исследована в научной литературе, однако данных соединений крайне мало. Связано это в большей степени с тем, что прочность такого соединения во многом зависит от прочностных характеристик применяемого композиционного материала, а именно межслоевой адгезии. Так же в большинстве работ не учитывается влияние на соединение «ПКМ – металл» термического воздействия в условиях вакуума, имитирующего эксплуатацию КА в условиях космоса.

Цель работы заключается в разработке метода соединения поверхности из ПКМ с материалами КЛТР, которых гораздо выше, чем КЛТР ПКМ. Новый метод позволит выровнять разницу в КЛТР при полимеризации ПКМ, а так же снизить трудоемкость при подготовке алюминиевой оснастки при изготовлении деталей из ПКМ по технологии вытравляемых оправок и уменьшить долю ручного труда.

#### Библиографические ссылки

1. Кудрявцева Г. И. Армирующие химические волокна для композиционных материалов. М.: Химия, 1992. 329 с.
2. Пилипенко А. Т., Пятницкий И. В. Аналитическая химия. М.: Химия, 1990. 846 с.
3. Слава Х. Э. Применение ультразвуковой спектроскопии для контроля качества композитных материалов // Механика композит. материалов. 1989. № 3. С.503–513.
4. Автоматизация акустического контроля композитных материалов / В.В. Лукша, Я.А. Лях, Я.Я. Индулевич, Х. Э. Слава, М.Я. Тутан // Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига, 1983. С. 225 – 232.
5. Ревин Г. Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: Учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2000
6. Мирошников В. П., Занимонец Ю. М. О влиянии остаточных напряжений в композитном материале на его эффективные реологические свойства // Механика композитных материалов. Рига, 1985. № 1. С. 59–66.

7. Система контроля отверждения смол на основе неразрушающей диэлектрической спектроскопии / В. Штраус, А. Калпинш, У. Ломановскис, Ю. Ромбахс // Механика композитных материалов. Рига, 1996. № 3. С. 401.

### References

1. G. I. Kudryavtsev. Reinforcing chemical fibers for composite materials M.: Chemistry, 1992. 329 p.
2. Pilipenko A. T., Pyatnitsky I.V. Analytical chemistry. Moscow: Chemistry, 1990. 846 p.
3. Slava H. E. Application of ultrasonic spectrometry for quality control of composite materials. *Mekhanika kompozit. materials.* – 1989. No. 3. P.503–513.
4. Automation of acoustic control of composite materials / V.V. Luksha, Ya.A. Lyakh, Ya.Ya. Indulevich, H. E. Slava, M. Ya. Tutan // *Methods and means of diagnosing the bearing capacity of products from composites.* – Riga, 1983. P. 225 – 232.
5. Revin G.L. Repair of structures made of polymer composite materials of aircraft: Textbook. Ulyanovsk: UIGTU, 2000
6. Miroshnikov V. P., Zanimonec U.M. On the influence of residual stresses in a composite material on its effective rheological properties // *Mechanics of Composite Materials.* Riga, 1985. No. 1. P. 59–66.
7. Strauss V., Kalpinsh A., Lomanovskis U., Rombachs J. Control system for resin curing based on non-destructive dielectric spectrometry // *Mechanics of Composite Materials.* Riga, 1996. No. 3. p. 401.

©Удод Л. С., Мезенцева Н. В., 2022

УДК 629.78(062)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ И ЗАРУБЕЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Т. А. Федченко, Н. А. Данилов, Я. А. Халеков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: fedchenko15.00@mail.ru

*Рассмотрены преимущества использования аддитивных технологий в производстве ракетно-космической техники и компании, использующие аддитивные технологии в производстве ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, аддитивные технологии.*

## THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN DOMESTIC PRODUCTION

T. A. Fedchenko, N. A. Danilov, Y. A. Khalekov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: fedchenko15.00@mail.ru

*The advantages of using additive technologies in the production of rocket and space technology and companies using additive technologies in the production of rocket and space technology are considered.*

*Keywords: rocket and space technology, additive technologies.*

В аэрокосмической отрасли при изготовлении ЖРД, топливных баков, компонентов спутников, теплообменников широкое применение получила технология аддитивного производства. Аддитивное производство – это технология послойного выращивания трехмерных объектов из металла. На данный момент в своем производстве аддитивные технологии используют как отечественные предприятия, так и зарубежные. Преимуществами использования аддитивных технологий являются:

1. Сокращение общего количества деталей готовой конструкции;
2. Низкая себестоимость и экономия расходных материалов;
3. Изготовление изделий с более сложной геометрической формой, которую невозможно получить традиционными методами изготовления;
4. Уникальные характеристики получаемой продукции. При послойном выращивании получается изделия с улучшенными свойствами. Например, изделия, получаемые на металлических принтерах по своим характеристикам и свойствам лучше, чем те же самые изделия, изготовленные традиционными способами [1].

Аддитивные технологии используют как в отечественном, так и в зарубежном производстве. С аддитивными технологиями в отечественном производстве работает команда молодых ученых из Самары и Санкт-Петербурга. Данная команда заявила о разработке нового 3D-принтера, способного печатать тугоплавкими и жаростойкими металлами. Данную установку рассчитывают применять с целью производства крупных узлов и деталей для авиакосмических двигателей [2].

В зарубежном производстве данные технологии применяет компания SpaceX для создания корабля CrewDragon. Данный корабль оборудован системой спасения из восьми двигателей SuperDraco, напечатанных при помощи технологии SLM-печати на 3D-принтере. Презентация корабля CrewDragon, также именуемого Dragon V2, состоялась в 2014 году. Космический корабль, предназначенный как для перевозки грузов, так и пилотируемых полетов, использует два вида силовых установок, включая 3D-печатные двигатели SuperDraco с регулируемой тягой [3]. Аппарат уже доказал свою надежность: все запуски в его истории были успешными.

Компания Aurora Flight Sciences (США) построила и провела летные испытания беспилотного летательного аппарата для оценки его аэродинамических свойств перед запуском данного изделия в серийное производство. Этот подход позволил запустить инновационные структурные механизмы, которые не были возможны с использованием традиционных технологий.

Одной из организаций, обладающих наибольшим опытом в применении деталей, отпечатанных на 3D-принтере, является компания Rocket Lab, базирующаяся в Новой Зеландии и в США. Компания Rocket Lab сегодня лидирует среди компаний, запускающих небольшие спутники, благодаря своей ракете Electron. До сих пор были произведены успешные запуски шести таких ракет – каждая из которых снабжена девятью двигателями Rutherford, созданными, в основном из полученных на 3d-принтерах металлических деталей. Кроме того, на борту этих ракет имеется и ряд других элементов, полученных по технологии 3d-печати [4].

Подводя итог вышеперечисленному можно утверждать, что применение аддитивных технологий при изготовлении таких сложных изделий как ракеты позволяет значительно удешевить их производство и переместить в гораздо более массовый сегмент. Благодаря преимуществам использования аддитивных технологий, в будущем они заменят традиционные методы в ракетостроении.

### Библиографические ссылки

1. Федченко Т.А. Преимущества использования аддитивных технологий в ракетостроении// Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т.. Красноярск, 2021. С.249-250. (Дата обращения 08.09.2022).

2. Как аддитивные технологии помогают в ракетостроении и авиакосмической отрасли? [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://make-3d.ru/news/kak-additivnye-texnologii-pomogayut-v-raketostroenii-i-aviakosmicheskoy-otrasli/> (дата обращения 08.09.2022)

3. Electronic textbook Wikipedia [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%94-0124> (дата обращения: 09.09.2022).

4. Rocket Lab: Небольшая фирма, начавшая революцию 3d печати в космосе [Электронный ресурс]. URL: <https://3d-daily.ru/engineering/rocket-lab-revolution-3dp.html> (Дата обращения 10.09.2022).

### References

1. Fedchenko T.A. Advantages of using additive technologies in rocket engineering// 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 vols.. Krasnoyarsk, 2021. pp.249-250. (Date of appeal 08.09.2022).

2. How do additive technologies help in the rocket and aerospace industries? Available at: <https://make-3d.ru/news/kak-additivnye-texnologii-pomogayut-v-raketostroenii-i-aviakosmicheskoy-otrasli/> (дата обращения 08.09.2022).

3. Electronic textbook Wikipedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%94-0124> (accessed 09.09.2022).

4. Rocket Lab: A small company that started the 3D printing revolution in space. Available at: <https://3d-daily.ru/engineering/rocket-lab-revolution-3dp.html> (accessed 10.09.2022).

© Федченко Т. А., Данилов Н. А., Халеков Я. А., 2022

УДК 629.78(062)

## АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ЗАРУБЕЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Я. А. Халеков, Н. А. Данилов, Т. А. Федченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: halekov01@bk.ru

*Рассмотрены зарубежные компании, использующие в своем производстве аддитивные технологии для производства ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: 3D-печать, ракетно-космическая техника, аддитивные технологии.*

## ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY IN FOREIGN PRODUCTION

Y. A. Khalekov, N. A. Danilov, T. A. Fedchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: halekov01@bk.ru

*Foreign companies using additive technologies for the production of rocket and space technology in their production are considered.*

*Keywords: 3D printing, rocket and space technology, additive technologies.*

В настоящее время набирает популярность внедрение аддитивных технологий в отрасль производства ракетно-космической техники. Аддитивные технологии представляют собой метод послойного наращивания материала. Одним из видов аддитивных технологий является SLM-печать. SLM или Selective laser melting – инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D-печать металлом). С помощью SLM создают как точные металлические детали для работы в составе узлов и агрегатов, так и неразборные конструкции, меняющие геометрию в процессе эксплуатации [1].

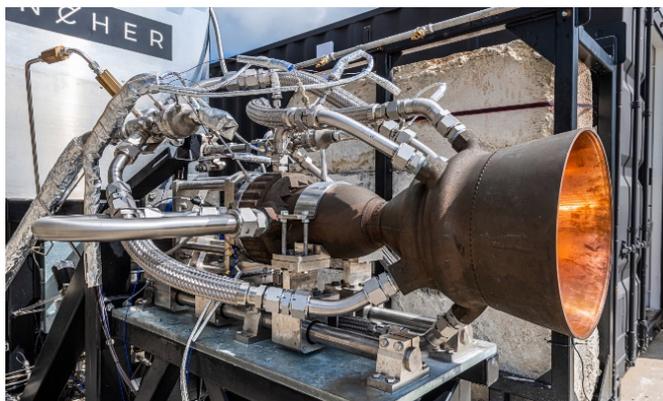
Использование SLM-печати дает определенный ряд преимуществ:

1. Низкая себестоимость готового изделия;
2. Снижение количества деталей за счет производства сложных геометрических конструкций, которые невозможно выполнить традиционными методами производства;
3. Большой выбор порошковых металлов для производства.

Рассмотрим ряд зарубежных компаний, занимающихся аддитивным производством. Ракетостроительная компания Launcher базирующаяся в Нью-Йорке начала испытания своего жидкостного ракетного двигателя E-2 в октябре 2020-го года (см. рисунок). Данный двигатель был создан специально для малых ракет-носителей для получения максимальной производительности при минимальных затратах. Сам по себе двигатель E-2 представляет собой произведенный при помощи аддитивных технологий ракетный двигатель с топливной парой кислород-керосин замкнутого цикла с тягой 98.7 кН и прицелом на показатель удельного импульса (то есть меру эффективности использования топлива) в 326 секунд. Камера сгорания данного двигателя представляет собой цельнометаллическую конструкцию из медного сплава высотой в один метр, созданную методом SLM-печати [2].

В зарубежном производстве данные технологии применяет компания SpaceX для создания корабля CrewDragon. Данный корабль оборудован системой спасения из восьми двигателей SuperDraco, произведенных при помощи технологии SLM-печати на 3D-принтере. Камера была напечатана из суперсплава Inconel, отличающегося высокой прочностью и надежностью. Презентация корабля CrewDragon, также именуемого Dragon V2, состоялась в 2014 году. Космический корабль, предназна-

ченный как для перевозки грузов, так и пилотируемых полетов, использует два вида силовых установок, включая 3D-печатные двигатели SuperDraco с регулируемой тягой [3]. Аппарат уже доказал свою надежность: все запуски в его истории были успешными.



Жидкостный ракетный двигатель E-2

Одной из организаций, обладающих наибольшим опытом в применении деталей, отпечатанных на 3D-принтере, является компания Rocket Lab, базирующаяся в Новой Зеландии и в США. Компания Rocket Lab сегодня лидирует среди компаний, запускающих небольшие спутники, благодаря своей ракете Electron. До сих пор были произведены успешные запуски шести таких ракет – каждая из которых снабжена девятью двигателями Rutherford, созданными, в основном из полученных на 3d-принтерах металлических деталей. Кроме того, на борту этих ракет имеется и ряд других элементов, полученных по технологии 3d-печати [4].

Исходя из вышеперечисленного, можно подвести итог, что SLM- печать имеют ряд преимуществ и недостатков. Некоторые преимущества позволяют аддитивным технологиям конкурировать с традиционными технологиями производства изделий в таких отраслях, как ракетостроение и авиация. Многие компании внедряют использование аддитивных технологий в свое производство, тем самым упрощая процесс создания деталей. В будущей при помощи аддитивных технологий возможно будет создание всего двигателя только одним видом производства, что является перспективным развитием данных технологий.

#### Библиографические ссылки

1. SLM (Selective Laser Melting) – технология 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/slm-tech/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/) (дата обращения 09.09.2022).
2. Компания Launcher и аддитивные технологии в новую эпоху развития космонавтики [Электронный ресурс]. URL: <https://thealphacentauri.net/83311-launcher-newspace/> (дата обращения 09.09.2022).
3. Electronic textbook Wikipedia [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%94-0124> (дата обращения: 09.09.2022).
4. Rocket Lab: Небольшая фирма, начавшая революцию 3d печати в космосе [Электронный ресурс]. URL: <https://3d-daily.ru/engineering/rocket-lab-revolution-3dp.html> (Дата обращения 10.09.2022)

#### References

1. SLM (Selective Laser Melting) – 3D printing technology. Available at: [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/slm-tech/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/) (accessed 09.09.2022).
2. Launcher Company and additive technologies in a new era of cosmonautics development. Available at: <https://thealphacentauri.net/83311-launcher-newspace/> (accessed 09.09.2022).
3. Electronic textbook Wikipedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%94-0124> (accessed 09.09.2022).
4. Rocket Lab: A small company that started the 3D printing revolution in space. Available at: <https://3d-daily.ru/engineering/rocket-lab-revolution-3dp.html> (accessed 10.09.2022).

© Халеков Я. А., Данилов Н. А., Федченко Т. А., 2022

УДК 621.3.062.9

## СПОСОБЫ РЕМОНТА ШТЫРЕЙ МНОГОКОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВИЛКИ

А. П. Чуватов

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 29  
\*E-mail: genoskesama@mail.ru

*В статье рассматриваются способы ремонта сломанного штыря многоконтактного соединителя.*

*Ключевые слова: ремонт штыря соединителя, дефекты соединителя, пайка.*

## METHODS OF REPAIR THE PINS OF A MULTI-PIN ELECTRICAL PLUG

A. P. Chuvatov

Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC  
29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: genoskesama@mail.ru

*The article deals with the method for repair a broken pin of a multi-pin connectors.*

*Keywords: connector pin repair, connector defects, soldering.*

Качество соединения при монтаже электросоединителей, определяется совокупностью энергетических и технологических параметров технологического процесса. Соединение должно быть надежным для качественного обеспечения электрических связей изделия [1].

При монтаже и транспортировании электрического многоконтактного соединителя или кабельных сборок в состав которых входят данные соединители, а также при возникновении внештатных ситуаций есть вероятность поломки штыря многоконтактного электрического соединителя из состава кабельных сборок бортовой или наземной кабельной сети военной или гражданской продукции и как следствие обрыв необходимой электрической связи.

При необходимости оперативного ремонта многоконтактного электрического соединителя используются различные методы, например, полная замена соединителя или перепайка контактов, или замена жгута, в зависимости этапа изготовления на котором находится соединитель или изделие в состав которого входит соединитель со сломанным штырем и от его конструктивных особенностей, например, в соединителях типа СНЦ232 контакты съемные [2]. Однако данные методы могут быть затруднительны ввиду больших затрат времени на демонтаж кабеля или соединителя с изделия для ремонта, также при перепайке может быть необходимо изготовить новый электрический соединитель.

Также при изготовлении изделия может возникнуть необходимость ремонта штыря электрического соединителя без изготовления нового соединителя. В таком случае можно воспользоваться способом ремонта электрической многоконтактной вилки, который включает частичное удаление материала изолятора и герметика электрической вилки на глубину, позволяющую установку на сломанный штырь вилки контакта, конструктивно повторяющего сломанную часть штыря вилки имеющего в основании глухое отверстие глубиной, согласованной с высотой выступающей части сломанного штыря для соосного и надежного крепления контакта к штырю с помощью пайки припоем, температура которого меньше, чем температура плавления у припоя основной распайки хвостовиков электрической многоконтактной вилки (рис. 1–3). Данный метод может быть применен для оперативного ремонта многоконтактных электрических вилок со сломанным штырем, запрессованным в изолятор, которые эксплуатируются без многократного сочленения-расчленения в течение своего гарантийного срока службы.

Контакт конструктивно повторяет сломанную часть штыря и имеет в основании глухое отверстие для соосного и надежного крепления контакта к сломанному штырю при помощи пайки припоем. Материал и покрытие контакта должны быть аналогичны материалу и покрытию штырей вилки [3].

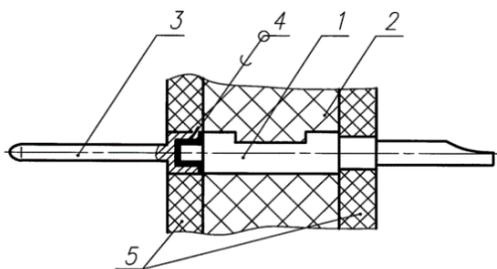


Рис. 1. 1 – сломанный штырь, 2 – изолятор, 3 – контакт вилки, 4 – припой, 5 – герметик



Рис. 2. Контакт для осуществления предлагаемого способа ремонта вилки со сломанным штырем, запрессованным в изолятор

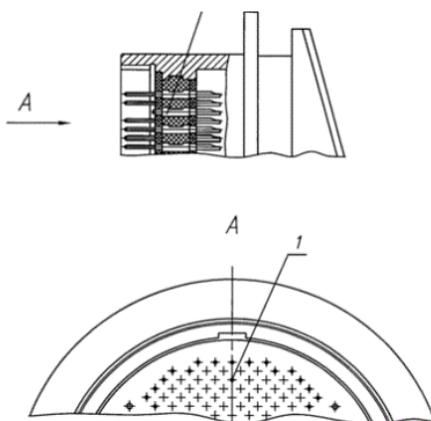


Рис. 3. Фрагмент многоконтактной вилки со сломанным штырем, запрессованным в изолятор.

Как результат при данном способе ремонта сломанных штырей многоконтактной электрической вилки нет необходимости в проведении разборно-сборочных работ по демонтажу соединителя или кабельной сборки с изделия и в проведении повторных приемосдаточных испытаний, что в свою очередь может привести к срывам договорных сроков. Также результатом данного метода является экономия, помимо времени, материальных средств. Применение данного способа возможно на соединителях разных конструктивных исполнений, герметичных и негерметичных.

### Библиографические ссылки

1. Зюзин А.Ф. «Монтаж эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок», 1986 г.
2. АО «Элекон» Каталог соединителей
3. Мышкин Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. Долгопрудный, Моск. обл.: Изд. дом «Интеллект», 2008. 560 с.

### References

1. Zyuzin A.F. «Montazh ekspluatatsiya i remont elektrooborudovaniya promyshlennykh predpriyatii i ustanovok», 1986 g.
2. AO «Elekon» Katalog soediniteley
3. Myshkin N.K. Elektricheskie kontakty / N.K. Myshkin, V.V. Konchits, M. Braunovich. Dolgoprudnyy, Mosk. obl.: Izd. dom «Intellekt», 2008. 560 s.

УДК 621.9.047

**ТОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ПОЛОСТЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛЬНЫМ  
КАТОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ**

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 факторы, влияющие на точность электрохимического формообразования полостей в тонкостенных и легкодеформируемых деталях ракетно-космической техники профильным катодом-инструментом.*

*Ключевые слова: электрохимическое формообразование, точность, катод-инструмент.*

**THE ACCURACY OF ELECTROCHEMICAL SHAPING OF CAVITIES  
OF THIN-WALLED PARTS BY A PROFILE CATHODE TOOL**

N. A. Shvaleva<sup>1\*</sup>, A. A. Fadeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Machine Building Plant JSC

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

*Factors affecting the accuracy of electrochemical shaping of cavities in thin-walled and easily deformable parts of rocket and space technology by a profile cathode tool are considered.*

*Keywords: electrochemical shaping, accuracy, cathode tool.*

Метод электрохимического формообразования находит все большее применение в современном машиностроении, в том числе при производстве деталей ракетно-космической техники. Электрохимическое формообразование – это метод изготовления деталей из металлов и сплавов с заданной формой, размерами и качеством поверхности, в котором металл с заданных мест удаляется путем локального электрохимического растворения [1]. Как правило, метод применяют для снятия заусенцев с мест, где предъявляются высокие требования к качеству и точности. Перспективным направлением реализации электрохимического формообразования в рамках производства является обработка полостей тонкостенных и легкодеформируемых деталей ракетно-космической техники. В данный момент, обработка вышеуказанных деталей осуществляется традиционным методом обработки – фрезерованием полостей в листе металла, где вследствие механического контакта инструмента с заготовкой возникает вероятность деформации тонких стенок изготавливаемой детали. Кроме того, большая часть материала уходит в стружку, а также после фрезерования остаются уступы, которые снимают дополнительными механическими операциями. Помимо этого, стойкость инструмента составляет около 30 минут, что вызывает необходимость смены инструмента в течение обработки. В связи с этим, обработка тонкостенных и легкодеформируемых деталей ракетно-космической техники – актуальная проблема.

Перспективность применения электрохимического формообразования обусловлена преимуществами метода. Процесс проводят при поддержании постоянного межэлектродного зазора, что обеспечивает отсутствие механического контакта инструмента (электрода) с поверхностью заготовки,

поэтому на показатели обрабатываемости не оказывают существенного влияния физико-механические свойства заготовки. Помимо этого, износ инструмента практически отсутствует, что, в свою очередь, увеличивает производительность процесса и повышает точность обработки. Еще одним преимуществом метода является возможность снижения шероховатости с одновременным повышением производительности. За одну операцию, при простом поступательном движении инструмента с высокой точностью и качеством поверхности формируется профиль детали, поэтому отсутствует необходимость в дополнительных операциях [2-4].

Известна конструкция катода-инструмента, которая повторяет профиль получаемой полости тонкостенной детали [5]. Электрохимическое формообразование осуществляется по схеме с подвижным катодом-инструментом с вертикальной и горизонтальной подачей к заготовке (см. рисунок).

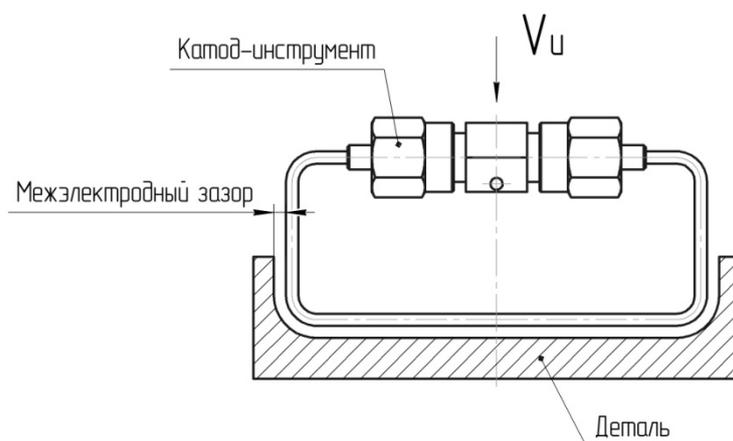


Схема обработки детали профильным катодом-инструментом

На точность размеров и формы получаемой тонкостенной детали влияют погрешности катода-инструмента, погрешности оборудования, погрешности связанные с отклонениями режима электрохимического формообразования от расчетного, а также величина припуска на обработку. Погрешность детали будет тем меньше, чем меньше погрешность катода-инструмента и чем больше время обработки.

Влияние на суммарную погрешность электрохимического формообразования оказывают величина межэлектродного зазора, нестабильность электропроводности электролита, выход по току (около 50% от всей погрешности), отклонение от расчетного режима течения электролита (около 30%), погрешности установки и настройки (около 30 %).

Указанные погрешности электрохимического формообразования профильным катодом-инструментом можно сократить рядом предупреждающих мер. На поверхности заготовки не допускаются окалины и другие неэлектропроводные загрязнения, вызывающие прекращение процесса на этих участках. Повысить точность электрохимического формообразования можно за счет уменьшения межэлектродного зазора. Кроме того, необходимо обеспечить стабильность межэлектродного зазора, за счет установки на поверхности катода-инструмента твердых упоров из изоляционных материалов (алмазные иглы, упоры из полимерных материалов). Уменьшить величину межэлектродного зазора можно применением импульсного напряжения. При обработке также применяют дополнительную ультразвуковую вибрацию, что ускоряет удаление продуктов обработки (шлама) из межэлектродного зазора и повышает устойчивость протекания процесса. Помимо этого, широко применяют локализацию процесса электрохимического формообразования за счет нанесения диэлектрических покрытий на заготовку.

При обработке с подвижным катодом-инструментом для обеспечения точности детали необходимо обеспечить постоянную скорость подачи инструмента. При постоянной скорости подачи инструмента процесс электрохимического формообразования с течением времени становится близким к стационарному режиму. В этом случае обеспечивается равномерное снятие припуска и высокое качество поверхностного слоя.

Таким образом, учитывая и предупреждая факторы, влияющие на точность электрохимического формообразования, можно сократить влияние указанных погрешностей. Тем самым увеличить точность получаемой полости тонкостенных деталей.

### Библиографические ссылки

1. Давыдов А. Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука, 1990. 272 с.
2. Давыдов А. Д. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования / А. Д. Давыдов, В. М. Волгин, В. В. Любимов // Электрохимия. 2004. Т. 40. №12. С. 1438-1480.
3. Седыкин Ф. В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М. Машиностроение, 1976. 302 с.
4. Zhu D., Wang K., Qu N. S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode // Annals of the CIRP. 2007. V. 56(1). P. 241-244.
5. Shvaleva N. A., Fadeev A. A., Analysis of the design of a slotted cathode tool for the electrochemical machining of thin-walled parts / Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022. No 29. P. 14-18. Dol 10.26160/2474-5901-2022-29-14-18.-EDN FKLXMY.

### Reference

1. Davydov A. D., Kozak E. *Vysokoskorostnoe electrokhimicheskoe formoobrazovaniye* [High-speed electrochemical shamping]. Moscow: Science, 1990. 272 p. (In Russ.).
2. Davydov A. D., Volgin V. M., Lyubimov V. V. [Electrochemical dimensional processing of metals: the process of shamping] // Electrochemistry. 2004. Vol. 40. No. 12. P. 1438-1480. (In Russ.).
3. Sedykin F. V. *Razmernaya electrokhimicheskaya obrabotka detaley machin* [Dimensional electrochemical processing of machine parts]. M.: Mechanical Engineering, 1976. 302 p. (In Russ.).
4. Zhu D., Wang K., Qu N. S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode // Annals of the CIRP. 2007. V. 56(1). P. 241-244.
5. Shvaleva N. A., Fadeev A. A., Analysis of the design of a slotted cathode tool for the electrochemical machining of thin-walled parts / Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022. No 29. P. 14-18. Dol 10.26160/2474-5901-2022-29-14-18.-EDN FKLXMY.

© Швалева Н. А., Фадеев А. А., 2022



**Секция**

**«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»**

УДК 519.852.3

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ МИНИМАЛЬНОЙ СУММЕ ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ

Д. Д. Абрамчик\*, Н. В. Шпигер, 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: abramchik\_daniil@mail.ru

*Представлена математическая модель, позволяющая определить оптимальное распределение информационных потоков в системах дистанционного зондирования Земли, при условии минимальной суммы пропускных способностей межспутниковых каналов.*

*Ключевые слова: спутниковая связь, канал связи, дистанционное зондирование Земли, распределение трафика.*

## A MATHEMATICAL MODEL FOR FINDING THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF INFORMATION FLOWS WITH A MINIMUM AMOUNT OF BANDWIDTH

D. D. Abramchik\*, N. V. Shpiger, K. E. Gaipov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: abramchik\_daniil@mail.ru

*A mathematical model is presented that makes it possible to determine the optimal distribution of information flows in Earth remote sensing systems, subject to the minimum sum of inter-satellite channel bandwidths.*

*Keywords: satellite communication, communication channel, Earth remote sensing, traffic distribution.*

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса – незаменимый инструмент изучения и постоянного мониторинга нашей планеты, помогающий эффективно использовать и управлять ее ресурсами. Современные технологии ДЗЗ находят применение практически во всех сферах нашей жизни. Космические системы ДЗЗ позволяют за короткое время получить необходимые данные с больших площадей (в том числе труднодоступных и опасных участков) [1]. Такие системы незаменимы на территориях, где поверхность Земли не позволяет проложить оптоволоконной связи для сбора и передачи информации. Для решения таких проблем таких проблем корпорацией «Роскосмос» разрабатывается проект «Сфера». Благодаря ей будет создана самая современная система коммуникаций и мониторинга, включающая как существующую, так и перспективную космическую инфраструктуру [2].

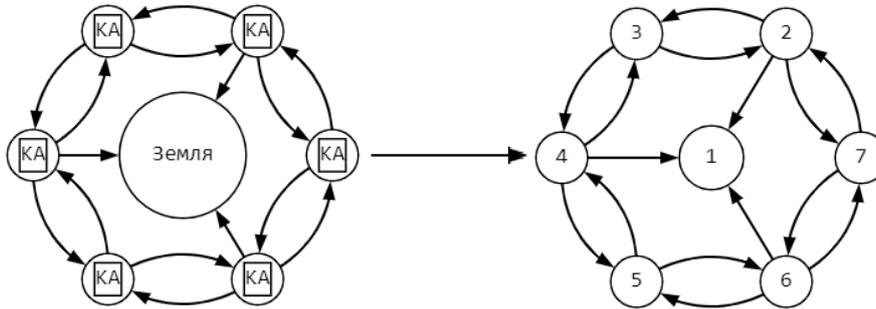
Однако в процессе эксплуатации могут возникнуть различные проблемы, из-за которых в сборе и передаче информации возникнут ошибки. Например, недостатком применения современных средств ДЗЗ является низкая оперативность получения информации [3]. Так же может возникнуть проблема в областях покрытия космических аппаратов (далее, КА). Она наиболее характерна для негеостационарных спутниковых систем связи (далее, НГССС), поскольку туда обычно входят системы на круговых низких и средних орбитах [4]. Если абоненты находятся в покрытии одного КА, то это КА напрямую обеспечивает связь между ними. В случае, если абоненты находятся в области покрытия разных КА, то требуется передать данные от одного КА другому. Проблема передачи данных от одного КА другому может быть решена двумя способами:

1. Расстановка большего числа земных станций (ЗС), однако такое крайне сложно, с учетом поверхности Земли.

2. Связать КА межспутниковыми линиями в полностью связную спутниковую сеть (если не учитывать связи с абонентскими терминалами, находящимися за пределами радиовидимости), чтобы каждый КА ССС мог связаться с другим любым КА ССС через другие КА, не обращаясь к ЗС [4]. Однако, в такой сети возникает проблема маршрутизации.

Информационное взаимодействие между спутниками группировки и между спутниками и наземными станциями является неотъемлемым элементом автономного планирования и управления [5]. Благодаря этому взаимодействию, между спутниками возникают каналы связи, и строится спутниковая сеть, по которой передаются данные. Поэтому получаемую информацию от каждого спутника ДЗЗ, можно представить в виде потока трафика идущего по данным каналам до спутников, связанных с ЗС. Определение оптимальных параметров каналов межспутниковой связи в системе ДЗЗ, через представленную математическую модель, может помочь обеспечивать более надежную и эффективную передачу данного трафика.

Благодаря имеющейся межспутниковой связи, системы ДЗЗ возможно представить в виде сетевой топологии (см. рисунок).



Пример системы ДЗЗ и её представление как сетевой топологии

Для полученной топологии составляется матрица маршрутов и столбец-вектор интенсивностей трафика по маршрутам. Транспонируя данную матрицу и умножая её на столбец-вектор, получаем матрицу интенсивностей потоков в каналах связи. Строки данной матрицы являются каналами связи спутник – ЗС и спутник – спутник. Поток, проходящий по этим каналам, представляет собой сумму

интенсивностей маршрутов, которые по ним проходят:  $\sum_{i=1}^k a_i = d$ , где  $a_i$  – интенсивность  $i$ -го маршрута,  $d$  – поток на канале.

Каждый спутник создает свой объем трафика и затем распределяет его по маршрутам, таким образом, для некоторой части маршрутов известен объем передаваемых данных по ним, что можно записать в виде системы равенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{k_1} a_i = d_1 \\ \sum_{i=k_1+1}^{k_1+k_2} a_i = d_2 \\ \dots \\ \sum_{j=1}^S k_j \\ \sum_{i=1+\sum_{j=1}^{S-1} k_j}^{S-1} a_i = d_S \end{array} \right. \quad (1),$$

$S$  – число источников.

Количество уравнений в данной системе (1) определяется числом источников информации.

Величина передаваемого потока ограничивается пропускными способностями каналов. Поэтому возникает система неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1 \leq R_1 \\ \dots \\ d_S \leq R_2 \end{array} \right. \quad (2),$$

где  $R_1$  – пропускная способность каналов спутник – ЗС,  $R_2$  – пропускная способность каналов спутник – спутник. Подставив суммы пропускных способностей, получим необходимую математическую модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{k_1} a_i \leq R_1 \\ \dots \\ \sum_{j=1}^S k_j \\ \sum_{i=1+\sum_{j=1}^{S-1} k_j} a_i \leq R_2 \end{array} \right. \quad (3).$$

С помощью системы (3) возможно определить оптимальное распределение трафика при минимальной сумме пропускных способностей.

#### Библиографические ссылки

1. Дистанционное зондирование Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/24707/>
2. Проект «Сфера» переходит к практической реализации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/>
3. А. Е. Привалов, В. В. Федяев, П. Ю. Бугайченко «Применение многоагентных технологий для построения имитационных моделей многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования земли» [Электронный ресурс]. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2020-imsvn-219-228.pdf>
4. Иванов В. И. «Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями» [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_35629208\\_11801431.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35629208_11801431.pdf)
5. Карсаев О. В. «Имитационное моделирование автономного управления группировкой малых спутников» [Электронный ресурс]. URL: [http://rirpc.ru/wp-content/uploads/2016/12/Известия\\_№1195\\_2018.pdf](http://rirpc.ru/wp-content/uploads/2016/12/Известия_№1195_2018.pdf)

#### References

1. Distancionnoe zondirovanie Zemli [Electronic resource]. URL: <https://www.roscosmos.ru/24707/>
2. Ivanov V. I. «Algoritm centralizovannoj mnogoputevoj marshrutizacii s balansirovkoj nagruzki v negeostacionarnoj sputnikovoj sisteme svyazi s mezhsputnikovymi liniyami» [Electronic resource]. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_35629208\\_11801431.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35629208_11801431.pdf)
3. A. E. Privalov, V. V. Fedyaev, P. YU. Bugajchenko «Primenenie mnogoagentnyh tekhnologij dlya postroeniya imitacionnyh modelej mnogosputnikovyh orbital'nyh gruppirovok distancionnogo zondirovaniya zemli» [Electronic resource]. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2020-imsvn-219-228.pdf>
4. Proekt «Sfera» perekhodit k prakticheskoj realizacii [Electronic resource]. URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/>
5. Karsaev O. V. «Imitacionnoe modelirovanie avtonomnogo upravleniya gruppirovkoj malyh sputnikov» [Electronic resource]. URL: [http://rirpc.ru/wp-content/uploads/2016/12/Izvestiya\\_№1195\\_2018.pdf](http://rirpc.ru/wp-content/uploads/2016/12/Izvestiya_№1195_2018.pdf)

© Абрамчик Д. Д., Шпигер Н. В., Гаипов К. Э., 2022

УДК 662.629.05

## РЕКОНФИГУРАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ КА АО «ИСС»

Е. Н. Голубев

Акционерное Общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева (АО «ИСС»)  
Российская Федерация, 662000, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52  
E-mail: gen@iss-reshetnev.ru.

*В настоящем докладе рассматривается алгоритмический подход к вопросам реконфигурации информационных сетей космических аппаратов производства АО «ИСС» на примере бортового комплекса управления с использованием перспективного бортового компьютера и маршрутизатора сети SpaceWire.*

*Ключевые слова: бортовая цифровая вычислительная машина, система управления, верификация алгоритмов управления, отработка систем управления, методики испытаний.*

## RECONFIGURATION OF ISS SATELLITE COMPUTER NETWORK

E. N. Golubev

JSC “Academician M.F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenina str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662000, Russian Federation  
E-mail: gen@iss-reshetnev.ru.

*This paper presents an algorithmic approach for the reconfiguration issue associated with computer networks of satellites being manufactured by JSC “ISS”. Onboard control subsystem with installed the next generation of on-board computer and the SpaceWire router is taken as an example to discuss such matter.*

*Keywords: On-Board Computer, control system, verification of control algorithms, tests of control systems, test methods.*

Компьютерные сети космических аппаратов, разрабатываемых с 2000 года, первоначально представляли из себя отработанный надежный магистральный мультиплексный канал, выполненный по ГОСТ В20570-2003 (MIL-STD-1553В) [3]. Большой опыт летной эксплуатации магистрального канала такого типа показал его высокую устойчивость при работе в составе космического аппарата, при этом алгоритмические средства применялись только к диагностике контроллеров канала и восстановлению и реконфигурации, при необходимости, данных в памяти контроллеров.

С появлением на космическом аппарате компьютерной сети SpaceWire, выполненной в соответствии с международным стандартом ECSS-E-50-12С [1], становится актуальной разработка и применение алгоритмических программных средств, обеспечивающих поддержание работоспособности такой сети при эксплуатации в реальных условиях работы.

На рисунке 1 условно показано построение компьютерной сети космического аппарата АО «ИСС» с использованием двух сетей: первая по ГОСТ В20570-2003 и вторая в соответствии с со стандартом ECSS-E-50-12С. Традиционно, магистраль по ГОСТ В20570-2003 используется как командная и для обмена данными с небольшой скоростью передачи, а сеть SpaceWire служит для высокоскоростной передачи данных большого объема.

Основой сети SpaceWire является сетевой коммутатор (СК), который обеспечивает маршрутизацию пакетов данных между приборами сети. В бортовом компьютере [2], [4] имеется свой маршрутизатор, через который организуется обмен данными по внутренней сети, не отличающийся от СК, кроме числа коммутируемых каналов.

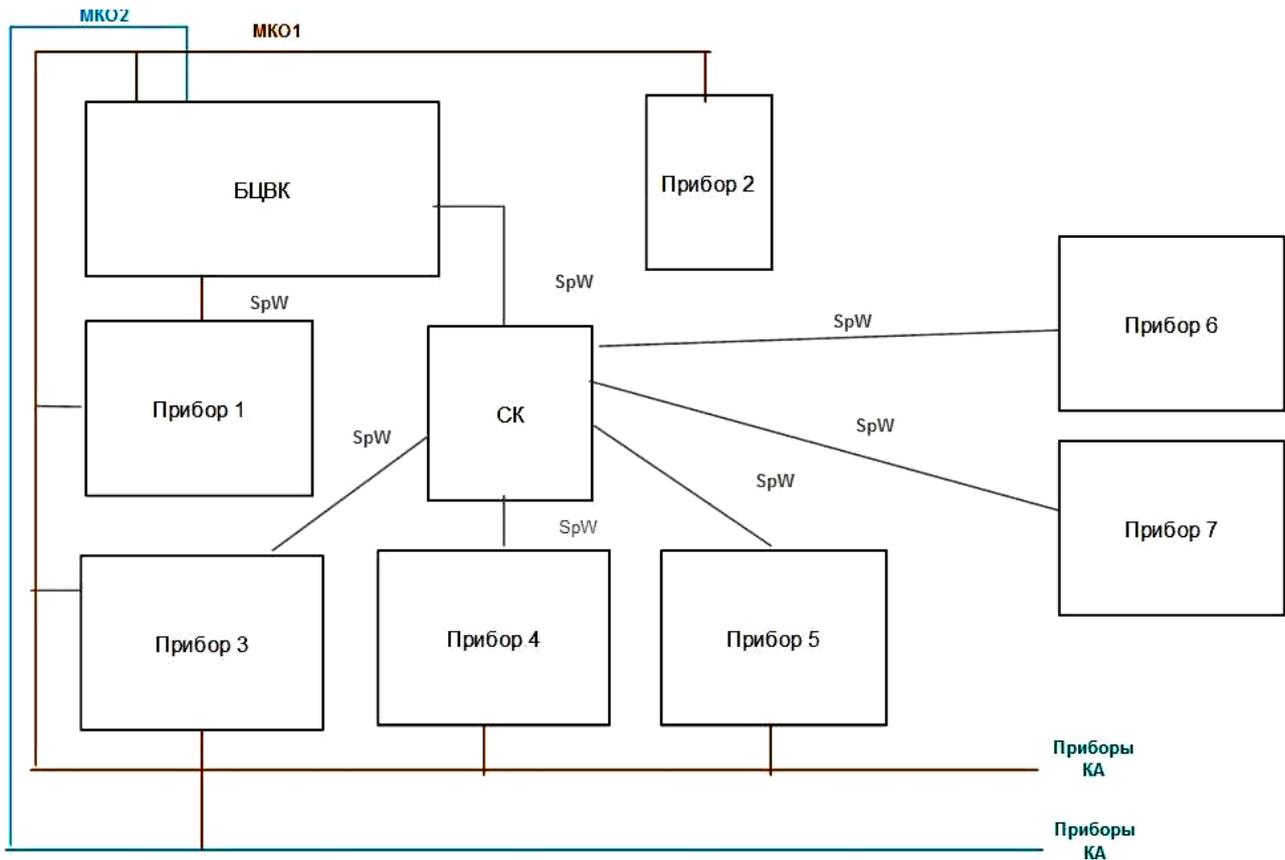


Рис. 1. Структурная схема информационной сети космического аппарата

Как указывается в работе [6], проверка сети SpaceWire проводится при обмене данными по сети в соответствии со стандартами SpaceWire [1]. При этом контролируется отсутствие сбоев при прохождении пакетов по основному маршруту, предусмотренному таблицей маршрутизации роутера (СК). В случае устойчивого сбоя обмена данными, основной маршрут бракуется с формированием соответствующей отчетной информации.

Однако, кроме проверки работоспособности самого канала, принципиальным моментом является контроль сохранности оперативных данных в устройствах памяти контроллеров, в том числе сохранность настроечных данных, в частности, таблицы маршрутизации, так как именно устройства памяти, в основном, подвержены воздействиям космических факторов.

Иерархия алгоритмических средств контроля устройств обмена данными в информационной сети показана в табл. 1.

Таблица 1

**Иерархия алгоритмических средств контроля устройств обмена данными в информационной сети**

Уровень аппаратуры	Контролируемые данные	Метод контроля
Бортовой компьютер	Исправность контроллера, в том числе устройств памяти	Периодический тест самопроверки компьютера Диагностика устройств канала программными средствами путем периодического съема и анализа данных в устройствах
	Сохранность настройки портов	
	Сохранность таблицы маршрутизации бортового компьютера	
Программируемый сетевой коммутатор	Сохранность настройки портов	
	Сохранность таблицы маршрутизации программируемого сетевого коммутатора	
Приборы системы управления, подключенные к сети	Сохранность эталона настройки портов	
Сетевой канал	Отсутствие сбоев при передаче пакетов	Регистрация сбоев драйвером обмена

Как уже было показано в работе [6], для диагностики состояния описываемого построения информационной сети космического аппарата хорошо подходят программно-аппаратные средства диагностики состояния КА, которые были разработаны в АО «ИСС» в начале 1980-х годов с появлением первого универсального бортового компьютера.

Состав и взаимодействие различных компонент программно-аппаратных средств диагностики состояния КА, используемых для анализа состояния компьютерной сети и принятия решения по ее реконфигурации, показан на рис. 2.

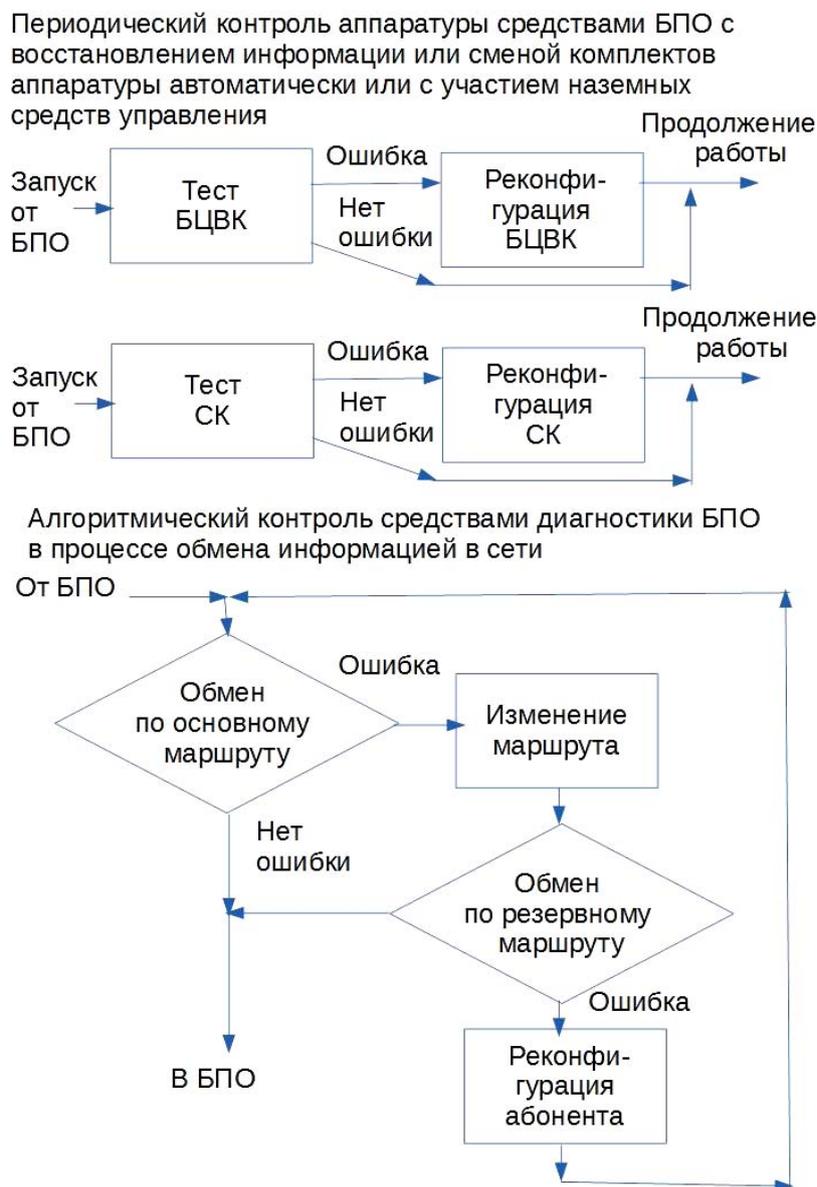


Рис. 2. Состав и использование компонент программно-аппаратных средств для анализа состояния компьютерной сети

Пример алгоритма диагностики нарушений обмена бортового компьютера с прибором бортового комплекса управления (БКУ) приведен в табл. 2.

В АО «ИСС» создан комплекс управления, использующий сеть SpaceWire в качестве высокоскоростного информационного канала, объединяющего приборы комплекса. Также прошло наземную отработку программное обеспечение, обеспечивающее поддержку компьютерной сети и диагностику отказов и сбоев, а также реконфигурацию информационного канала. Такое программное обеспечение использует отработанные на протяжении длительного времени эксплуатации различных КА алгоритмы дежурного контроля и диагностики.

**Пример алгоритма диагностики нарушений обмена бортового компьютера с бортовой аппаратурой БКУ**

Анализ данных и идентификация аномалии	Принятие решения
Устойчивая ситуация недостоверности пакетов при обмене с бортовой аппаратурой БКУ сопровождается формированием признаков ПО БКУ	Формируется признак запрета обмена по SpaceWire по маршруту 1 с бортовой аппаратурой БКУ и проводится обмен по 2-му маршруту.
Если обмен с бортовой аппаратурой БКУ не состоялся, формируется обобщенный признак недостоверности SpaceWire -канала	При устойчивой ситуации недостоверности обмена по SpaceWire, организуется переключение комплектов бортовой аппаратуры БКУ.

Полученные результаты позволяют провести летные испытания спроектированной системы управления и в дальнейшем перейти на новый этап проектирования систем управления КА со значительно улучшенными характеристиками

**Библиографические ссылки**

1. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization, July, 2008.
2. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. – 1992.
3. ГОСТ В20570-2003
4. 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.
5. 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.
6. Голубев Е. Диагностика компьютерных сетей спутников АО «ИСС», РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Сборник тезисов. Сибирский государственный университет им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск), 2020

**References**

1. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization, July, 2008.
2. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. – 1992.
3. ГОСТ В20570-2003
4. Golubev E. Apparato-programmnyy 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.
5. 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.
6. Golubev E., Diagnostics of ISS satellite computer network RESHETNEVSKIE CHTENIA. Sbornik tezisov. Sibirskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet im. akad. M.F.Reshetneva, 2020.

© Голубев Е. Н., 2022

## ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ СОГЛАСОВАННОСТИ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПРИ ОЦЕНКЕ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОЖЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

И. В. Гринь\*, О. А. Морозов, Н. А. Пинегина

Нижегородский госуниверситет имени Н. И. Лобачевского  
Российская Федерация, 603022, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23  
E-mail: \* yelowt@mail.ru

*Задача оценки координат нескольких источников широкополосного радиоизлучения осложнена существенным масштабированием спектра информационных сигналов, возникающим вследствие эффекта Доплера, а также проблемой однозначного определения набора навигационных параметров для каждого из источников. В данной работе предложен алгоритм, устраняющий возникающую неоднозначность, на основе критерия согласованности временных задержек. Предложенный алгоритм может быть применен совместно с методом построения взаимной функции неопределенности, позволяющим одновременно компенсировать смещение и масштабирование спектра.*

*Ключевые слова: критерий согласованности временных задержек, взаимная функция неопределенности, взаимная временная задержка.*

## TIME DELAYS CONGRUENCE CRITERION IN THE PROBLEM OF MULTIPLE RADIO EMISSION SOURCES NAVIGATION PARAMETERS ESTIMATION

I. V. Grin\*, O. A. Morozov, N. A. Pinegina

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
23, prospect Gagarina, Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation  
E-mail: \* yelowt@mail.ru

*The problem of multiple radio emission sources navigation parameters estimation is complicated by the significant spectrum scaling arisen due to the Doppler effect, as well as the problem of navigation parameters sets ambiguous determining for each of the sources. In this paper, we propose an algorithm based on the time delays congruence criterion allowing to eliminate the ambiguity. The proposed algorithm can be applied in conjunction with the mutual ambiguity function analysis method, which makes it possible to simultaneously compensate for the spectrum shift and scaling.*

*Keywords: time delays congruence criterion, mutual ambiguity function, mutual time delay.*

**Введение.** В настоящее время задача определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) методами пассивной пеленгации в реальном масштабе времени остается наиболее актуальной задачей при проектировании спутниковых систем связи [1]. При реализации алгоритмов, позволяющих решить данную задачу, возникает необходимость определения навигационных параметров. В случае применения разностно-дальномерного метода, необходимо определять взаимные временные задержки (ВВЗ) распространения сигналов, в условиях значительного влияния эффекта Доплера [2].

Традиционно для определения ВВЗ сигналов в условиях низкого отношения сигнал-шум (ОСШ) в каналах связи используется метод максимального правдоподобия, который сводится к построению и анализу взаимной функции неопределенности (ВФН) опорного и исследуемого сигналов [3]. Для пары принимаемых сигналов  $s_1$  и  $s_2$  ВФН имеет следующий вид:

$$A_{12}(\Delta t, \Delta f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) s_2(t + \Delta t) \exp(-j2\pi\Delta f t) dt. \quad (1)$$

Для широкополосных сигналов с базой не менее  $10^2$ - $10^3$  эффект масштабирования спектра становится существенным, что оказывает значительное влияние на выраженность главных максимумов

ВФН (выраженность главных максимумов становится недостаточной для проведения качественного анализа) [4]. В данной работе предлагается использовать модифицированный подход к построению ВФН, позволяющий одновременное компенсирование смещения и масштабирования спектра. Т.к. данные эффекты обусловлены значительным влиянием эффекта Доплера:

$$f_{\partial} = f_0 (1 + k), \tag{2}$$

где  $k = v/c$  – коэффициент Доплера,  $v$  – скорость сближения источника и приемника,  $c$  – скорость света,  $f_0$  – частота излученного сигнала,  $f_{\partial}$  – частота принятого сигнала, представляется возможным использование разницы доплеровских коэффициентов ( $\Delta k$ ) для описания искажения спектров сигналов при построении ВФН:

$$A_{12}(\Delta t, \Delta k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t\Delta k) s_2^*((t + \Delta t)\Delta k) \exp(-j2\pi f_0 \Delta k t) dt. \tag{3}$$

В случае наличия нескольких ИРИ при проведении оценки ВВЗ сигналов, принимаемых КА, на основе построения и анализа ВФН неизбежно возникает проблема однозначного соотнесения набора навигационных параметров к конкретному источнику, каждая ВФН будет иметь  $N$  пиков.

Рассмотрим взаимные временные задержки, соответствующие  $k$ -му источнику:  $\Delta t_{12k}, \Delta t_{23k}, \dots, \Delta t_{M1k}$ . Каждую из задержек можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta t_{12k} = \tau_{1k} - \tau_{2k}; \\ \Delta t_{23k} = \tau_{2k} - \tau_{3k}; \\ \dots \\ \Delta t_{M1k} = \tau_{Mk} - \tau_{1k}. \end{cases} \tag{4}$$

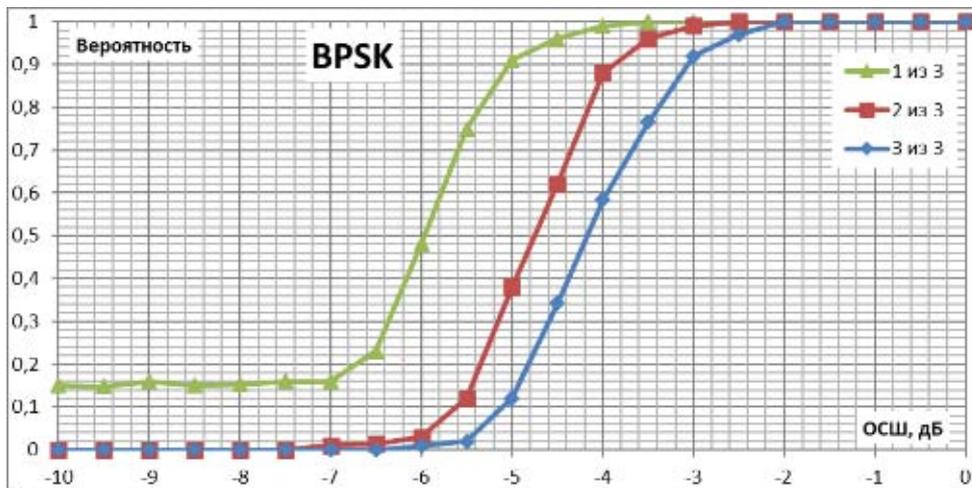
где  $\tau_{ij}$  – время распространения излучения от  $j$ -го источника до  $i$ -го приемника.

Можно отметить, что задержки, соответствующие одному источнику, обладают следующим свойством:

$$\Delta t_{12k} + \Delta t_{23k} + \dots + \Delta t_{M1k} = \tau_{1k} - \tau_{2k} + \tau_{2k} - \tau_{3k} + \dots + \tau_{Mk} - \tau_{1k} = 0. \tag{5}$$

Алгоритм, реализующий устранение возникающей неоднозначности, может быть представлен следующим образом: на основе оцененных ВВЗ с помощью прямого перебора выбираются группы задержек, доставляющие минимум критерию согласованности задержек [5].

**Результаты моделирования.** На основе компьютерного моделирования проведено исследование зависимости вероятности правильной работы алгоритма оценки взаимной временной задержки от ОСШ в исследуемых сигналах. Учитывалось найденное количество взаимных временных задержек в каждой выделенной группе. Усреднение проводилось по 1000 реализациям. Исследовались конфигурации, содержащие 3 источника излучения. На рисунке представлены полученные зависимости для широкополосных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты на основе двоичной фазовой (BPSK) манипуляции.



Зависимости вероятностей корректного соотнесения набора временных задержек источникам излучения от ОСШ в исследуемых сигналах

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что описанный выше алгоритм показывает устойчивую работу при ОСШ в каналах связи до  $-3$  дБ.

### Библиографические ссылки

1. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496с.
2. Логинов А. А., Морозов О. А., Солдатов Е. А., Хмелев С. Л. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. № 3(50), 2007. с. 255.
3. Гринь И. В., Ершов Р.А., Морозов О. А. // Системы управления и информационные технологии. № 3(61), 2015. с. 18.
4. Гринь И. В., Ершов Р. А., Морозов О. А. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. № 10(62), 2019. с. 779.
5. Гринь И. В., Ершов Р. А., Морозов О. А. // Системы управления и информационные технологии, № 2.1(56), 2014. с.124.

### References

1. Grishin Yu. P., Ipatov V. P., Kazarinov Yu. M. Radio engineering systems: textbook for universities on special. "Radio Engineering" / Ed. Yu. M. Kazarinova. – M.: Higher. school, 1990. 496 p.
2. Loginov A. A., Morozov O. A., Soldatov E. A. // News of higher educational institutions. Radiophysics, No. 3(50), 2007. p. 255.
3. Grin I. V., Ershov R. A., Morozov O. A. // Control systems and information technologies, No. 3(61), 2015. – p.18.
4. Grin I. V., Ershov R. A., Morozov O. A. // News of higher educational institutions. Radiophysics, No. 10(62), 2019. p. 779.
5. Grin I. V., Ershov R. A., Morozov O. A. // Control systems and information technologies, No. 2.1(56), 2014. – p.124.

© Гринь И. В., Морозов О. А., Пинегина Н. А., 2022

УДК 621.396

## ОСНОВНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ НАВИГАЦИИ ПО ТЕЛАМ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

А. О. Жуков

ФГБНУ «Аналитический центр»  
Российская Федерация, 109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33/4  
ФГБУН «Институт астрономии Российской академии наук»  
Российская Федерация, 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, 48  
E-mail: aozhukov@mail.ru

*Рассмотрен способ определения координат объекта по телам Солнечной системы, а также основные погрешности определения положения космических аппаратов с использованием навигации по телам Солнечной системы.*

*Ключевые слова: определение координат, Солнечная система, космический аппарат, навигация, погрешность.*

## BASIC ERRORS OF NAVIGATION ALONG THE BODIES OF THE SOLAR SYSTEM

A. O. Zhukov

Expert and Analytical Center  
33, Building 4, Talalikhina Str., Moscow, 109316, Russian Federation  
<sup>2</sup>Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences  
48, Pyatnitskaya Str., Moscow, 119017, Russian Federation  
E-mail: aozhukov@mail.ru

*The method of determining the coordinates of an object by the bodies of the solar system, as well as the basic errors in determining the position of spacecraft using the navigation on the bodies of the solar system are considered.*

*Keywords: coordinate determination, solar system, spacecraft, navigation, error.*

Навигация в пределах системы Земля-Луна становится актуальной задачей в связи с началом выполнения космических программ освоения Луны, объявленных США, Китаем и Российской Федерацией [1-4].

Для навигации в системе Земля-Луна могут систематически использоваться следующие три небесных тела: Земля, Луна и Солнце. Эти объекты практически всегда видны из любой точки системы Земля-Луна, исключения составляют только небольшие области пространства, в котором одно из этих тел закрывает или перекрывает другое.

Особенностью тел Солнечной системы, которая отличает их близкое расположение к Солнцу (и, соответственно, к Земле). Расстояние от Солнца до объектов Солнечной системы, которые можно использовать для решения задач навигации, не превышает примерно 100 а.е.

Для навигации по телам Солнечной системы подходят только объекты с хорошо известным движением, т.е. с точными эфемеридами. Для этих тел мы умеем определять их положение в инерциальной системе координат, в центре которой находится Земля, Солнце или барицентр Солнечной системы. На любой заданный момент времени  $t$  можем вычислить три координаты такого тела  $x(t)$ ,  $y(t)$  и  $z(t)$  или радиус-вектор  $\vec{r}(t)$ . Эфемериды тел Солнечной системы известны нам априори из ранее сделанных наблюдений.

Помимо этого с борта космического аппарата (КА), положение которого необходимо определить, мы проводим позиционные наблюдения объекта Солнечной системы с известными эфемеридами, в результате чего определяем его положение на фоне звезд, т.е. определяем единичный вектор  $\vec{i}$  направления на видимое положение объекта с места расположения КА.

В этом случае возможные места нахождения КА в пространстве находятся на луче, задаваемом следующим уравнением

$$\vec{r}(t) = \vec{\varepsilon}(t) - \ell \cdot \vec{u}, \quad (1)$$

где  $\ell$  – неизвестное расстояние от тела Солнечной системы, используемого в качестве ориентира, до КА.

Отметим, что формула (1) не включает в себя каких-либо ошибок.

Погрешность определения положения КА в пространстве по формуле (2) имеют два источника: во-первых, могут быть неточны эфемериды объекта-ориентира  $\vec{\varepsilon}(t)$ ; во-вторых, видимое с борта КА положение объекта-ориентира  $\vec{u}$  измеряется с конечной точностью.

Погрешность эфемериды  $\Delta x_1$  полностью переносится на положение КА, т.е. если мы знаем положение ориентира в момент наблюдения с погрешностью 100 км, то и погрешность положения КА не сможет быть меньше 100 км. Ошибка  $\Delta x_1$  не зависит от расстояния между КА и ориентиром.

Ошибка определения видимого направления на ориентир  $\Delta \varphi$  дает вклад в ошибку положения КА равный  $\Delta x_2 = \ell \cdot \Delta \varphi$ ,  $0 < \ell < \infty$ . Эта ошибка линейно растет с увеличением расстояния между ориентиром и КА. Характерное значение этой погрешности хорошо видно из следующей формулы

$$\Delta x_2 = (730 \text{ км}) \left( \frac{d\varphi}{1 \text{ угл.с}} \right) \left( \frac{\ell}{1 \text{ а.е.}} \right). \quad (2)$$

Полная погрешность положения КА будет равна

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}.$$

Заметим, что погрешности положения КА в рассмотренной ситуации имеют место только в направлениях перпендикулярных вектору  $\vec{u}$ , поскольку вдоль направления этого вектора положение КА не определено.

Зная только эфемериду одного объекта ориентира  $\vec{\varepsilon}(t)$  и его видимое положение на небе  $\vec{u}$ , мы не можем определить положение КА в пространстве, поскольку расстояние  $\ell$  между КА и ориентиром неизвестно.

Для его определения нужны дополнительные сведения, например, априори известный линейный размер (диаметр) объекта-ориентира –  $d$  и измеренный с борта КА видимый угловой размер –  $\theta$  этого объекта. В этом случае расстояние между КА и объектом оценивается по формуле

$$\ell = \frac{d}{\theta}. \quad (3)$$

Обе величины, используемые для определения  $\ell$ , содержат погрешности:  $d \pm \Delta d$  и  $\theta \pm \Delta \theta$ . Из-за этого расстояние  $\ell$  тоже определяет с погрешностью

$$\Delta \ell = \ell \sqrt{\left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \theta}{\theta} \right)^2}. \quad (4)$$

Видимые угловые ориентиров определяются с большими погрешностями, чем направление на их центр, т.е.  $\Delta \varphi \ll \Delta \theta$ . Отсюда вытекает, что  $\Delta x \ll \Delta \ell$ . Имеет место ситуация с неравноточными погрешностями.

Если мы наблюдаем для объекта-ориентира с известными эфемеридами  $\vec{\varepsilon}_1(t), \vec{\varepsilon}_2(t)$ , и для каждого из них определяем видимые положения на небе, соответственно,  $\vec{u}_1, \vec{u}_2$ , то по формуле (1) находим уравнения для двух лучей

$$\begin{aligned} \vec{r}_1(t) &= \vec{\varepsilon}_1(t) - \ell_1 \cdot \vec{u}_1; \\ \vec{r}_2(t) &= \vec{\varepsilon}_2(t) - \ell_2 \cdot \vec{u}_2. \end{aligned} \quad (5)$$

В идеальном случае эти лучи должны пересекаться, а КА должен находиться в точке их пересечения. Из-за погрешностей эфемерид и измерений видимых положений лучи пересекаться не будут, КА будет находиться вблизи места максимального сближения лучей. Знание собственных размеров ориентиров и измерение их видимых диаметров в этом методе не требуются.

Аналогичную процедуру можно проделать по 3 или более объектам-ориентирам. В этом случае расстояния максимального сближения лучей можно усреднить, что повысит точность определения положения КА.

Похожий метод автономной навигации, известный под названием AutoNav, был испытан в космической миссии Deep Space 1.

Заметим, что если угловое расстояние между двумя объектами ориентирами близко к  $90^\circ$ , то погрешности определения будут примерно одинаковыми во всех направлениях.

### Библиографические ссылки

1. Никифоров М. Г., Захаров А. И., Прохоров М. Е., Галушина Т. Ю., Жуков А. О. Оценка возможности практической реализации автономной навигации космических аппаратов в дальнем космосе по астероидам // *Механика, управление и информатика*, 2015. Т. 7. № 2(55). С. 311-322.

2. Карцан И.Н., Ефремова С.В. Мультиверсионная модель программного обеспечения систем управления космическим аппаратом с ранжированием принятия решения. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2021. Т. 22. № 1. С. 32-46.

3. Карцан И.Н. Метод исключения ошибок определения местоположения при одновременном использовании навигационных систем. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2008. № 3(20). С. 101-103.

4. Жуков А.О., Башкатов А.И., Доронина Е.Д., Карцан И.Н., Клементьева М.А., Козлова Т.А. Контроль движения малых тел солнечной системы // *Российская наука, инновации, образование – РОСНИО – 2022: сборник научных статей по материалам Всероссийской научной конференции*. Красноярск, 2022. С. 90-95.

### References

1. Nikiforov M. G., Zakharov A. I., Prokhorov M. Ye., Galushina T. YU., Zhukov A. O. [The possibility of spacecraft autonomous navigation by asteroids in deep space]. *Mechanics, Control and Informatics*, 2015. Vol. 7. no. 2(55). pp. 311-322. (In Russ.)

2. Kartsan I.N., Efremova S.V. [Multiversion model of software control systems for space vehicles with range of decision-making]. *The Siberian Aerospace Journal*. 2021. no. 1(22). pp. 32-46. (In Russ.)

3. Kartsan I.N. [The exceptions mistakes method of position determination when navigation systems at the same time are used]. *Vestnik SibGAU*. 2008. no. 3(20). pp. 101-103. (In Russ.)

4. Zhukov A.O., Bashkatov A.I., Doronina E.D., Kartsan I.N., Klementeva M.A., Kozlova T.A. [Controlling the motion of small bodies in the solar system]. *Proceedings of the All-Russian scientific conference «Russian science, innovations, education»*. Krasnoyarsk, 2022. pp. 90-95. (In Russ.)

© Жуков А. О., 2022

УДК 621.396

## СИСТЕМЫ МАЯКОВ ИЛИ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ\*

И. Н. Карцан

Морской гидрофизический институт РАН  
Российская Федерация, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: kartsan2003@mail.ru

*Рассмотрены некоторые отличия в системе определения координат объектов как с использованием системы маяков, так с использованием навигационных спутниковых систем.*

*Ключевые слова: определение координат, система маяков, космический аппарат, спутниковая навигационная система.*

## BEACON SYSTEMS OR NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

I. N. Kartsan

Marine Hydrophysical Institute of RAS  
2, Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russian Federation  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: kartsan2003@mail.ru

*Some differences in the system for determining the coordinates of objects both using the beacon system and using navigation satellite systems are considered.*

*Keywords: coordinate determination, beacon system, spacecraft, satellite navigation system.*

Шесть десятилетий космической эры основным методом навигации, т.е. определения положения космических аппаратов (КА) в пространстве, были наблюдения с Земли [1-3]. Сеть наземных пунктов навигационных наблюдений (астрономических, радиотехнических, радиолокационных и лазерных) уже сегодня предельно загружена, для решения возникающих проблем требуется ее существенное расширение [4, 5]. Частично эту проблему решает использование в космосе систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и им подобных), но эти системы надежно работают только на низких околоземных орбитах (до 2-3 тыс. км) [6-8]. Все перечисленные причины объясняют актуальность и интерес к разработкам методов автономной навигации в космическом пространстве.

В спутниковых навигационных системах источником сигналов является космическая группировка специализированных навигационных КА, излучающих сигналы в направлении Земли. При этом гарантированной областью функционирования клиентской навигационной аппаратуры (приемников) сигнала является поверхность Земли или небольшие высоты над ней (до 2000–3000 км), где и располагается подавляющее число клиентов спутниковых навигационных систем (рис. 1).

Навигационные спутники находятся на средних орбитах над Землей, основное число клиентов – на Земле или вблизи поверхности Земли.

Но устройство навигационной системы можно изменить: расположить источники сигналов – «маяки» – на поверхности Земли. Из-за того, что маяки расположены на поверхности, клиентом такой системы может быть только космический аппарат. Летающие на небольших высотах самолеты, а, тем более, клиенты на поверхности суши или океана не могут быть клиентами этой системы, так как не смогут одновременно принимать сигналы от нескольких маяков (рис. 2).

Система маяков: маяки на поверхности Земли, все клиенты – в космосе

\* Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

Для Земли наиболее удобный диапазон для работы маяков является радиодиапазон вблизи 1 ГГц, где атмосфера Земли имеет наибольшую прозрачность.

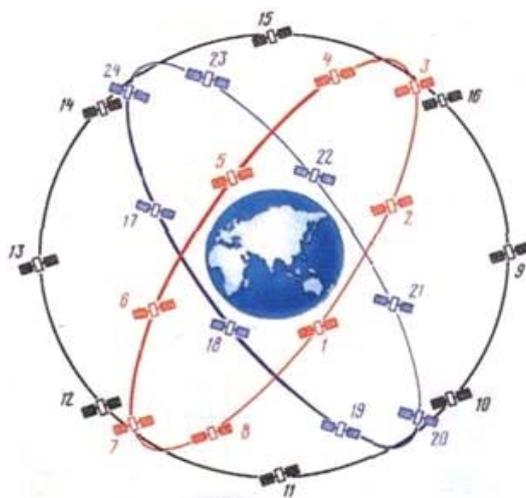


Рис. 1. Космический сегмент навигационной спутниковой системы

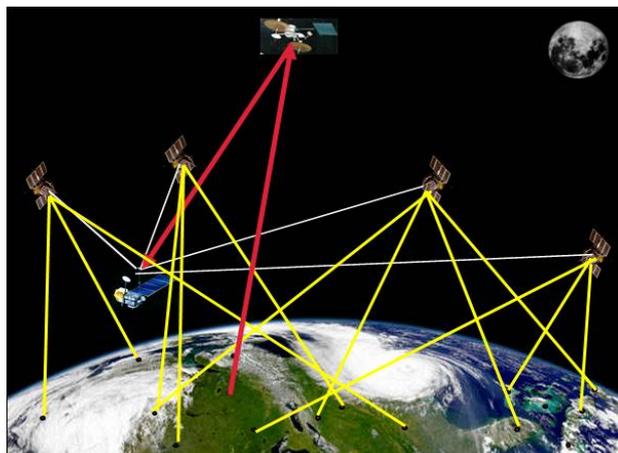


Рис. 2. Система маяков

Преимуществом системы маяков является относительная дешевизна наземных передающих станций по сравнению с космическими аппаратами (включая вывод их на орбиту). Еще одним преимуществом системы маяков является то, что передатчики неподвижно установлены на поверхности Земли и их положение можно с высокой точностью определить различными способами.

Единственной системой радиомаяков, работающей сегодня на Земле, является навигационная система DORIS, описанная в следующем подпункте.

### Библиографические ссылки

1. Никифоров М. Г., Захаров А. И., Прохоров М. Е., Галушина Т. Ю., Жуков А. О. Оценка возможности практической реализации автономной навигации космических аппаратов в дальнем космосе по астероидам // Механика, управление и информатика, 2015. Т. 7. № 2(55). С. 311-322.

2. Гедзюн В. С., Жуков А. О. Методический подход формирования оптимального поиска космических объектов измерительными средствами. В сборнике: Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления. сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции. ФГБНУ «Аналитический центр» Минобрнауки России. 2018. С. 130-132.

3. Бондаренко А. П., Оводенко В. Б., Дюжева М. М., Трекин В. В., Жуков А. О., Евенко А. В. О некоторых ограничениях корректировки модели среды распространения на базе информации GPS /

ГЛОНАСС-приемников. Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2018. № 1 (137). С. 57-63.

4. Жуков А.О., Окунев Е.В. Радиотехнический мониторинг окружающей среды пространственно-распределенными информационными системами. В сборнике: МИНЦЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. труды Третьей Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров, посвященной 70-летию Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца и 70-летию ФИЗТЕХА. 2016. С. 293-303.

5. Карцан И.Н., Ефремова С.В. Мультиверсионная модель программного обеспечения систем управления космическим аппаратом с ранжированием принятия решения. Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22. № 1. С. 32-46.

6. Карцан И.Н. Метод исключения ошибок определения местоположения при одновременном использовании навигационных систем. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2008. № 3(20). С. 101-103.

7. Жуков А.О., Пестун У.А., Трофимов Р.В. К вопросу оценки эффективности применения разнородных разноведомственных и международных средств контроля космического пространства. В сборнике: Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 290-293.

8. Гамишаев Р.А., Карцан И.Н. Радионавигационные системы и их классификация. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1. № 7. С. 293-295.

### References

1. Nikiforov M. G., Zakharov A. I., Prokhorov M. Ye., Galushina T. YU., Zhukov A. O. [The possibility of spacecraft autonomous navigation by asteroids in deep space]. *Mechanics, Control and Informatics*, 2015. Vol. 7. no. 2(55). pp. 311-322. (In Russ.)

2. Gedzyun V. S., Zhukov A. O. Metodicheskiy podkhod formirovaniya optimal'nogo poiska kosmicheskikh ob'yektov izmeritel'nymi sredstvami [Methodical approach to the formation of the optimal search for space objects by measuring means]. *Proceedings of the 3<sup>th</sup> All-Russian scientific research conference «Issues of control of economic activity and financial audit, national security, system analysis and management»*. 2018. С. 130-132. (In Russ.)

3. Bondarenko A. P., Ovodenko V. B., Dyuzheva M. M., Trekin V. V., Zhukov A. O., Evenko A. V. [Some of the limitations of the adjustment model of the propagation medium on the basis of information from GPS/GLONASS receivers]. *Defense industry achievements - Russian scientific and technical progress*. 2018. no. 1 (137). pp. 57-63. (In Russ.)

4. Zhukov A.O., Okunev E.V. Radiotekhnicheskii monitoring okruzhayushchey sredy s pomoshch'yu prostranstvennykh raspredelennykh informatsionnykh sistem [Radio engineering monitoring of environment by the spatial distributed information systems]. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> All-Russian scientific technical conference "Mintsev readings"*. 2016. pp. 293-303. (In Russ.)

5. Kartsan I.N., Efremova S.V. [Multiversion model of software control systems for space vehicles with range of decision-making]. *The Siberian Aerospace Journal*. 2021. no. 1(22). pp. 32-46. (In Russ.)

6. Kartsan I.N. [The exceptions mistakes method of position determination when navigation systems at the same time are used]. *Vestnik SibGAU*. 2008. no. 3(20). pp. 101-103. (In Russ.)

7. Zhukov A.O., Pestun U.A., Trofimov R.V. K voprosu otsenki effektivnosti primeneniya raznorodnykh raznovedomstvennykh i mezhdunarodnykh sredstv kontrolya kosmicheskogo prostranstva [On the issue of evaluating the effectiveness of the use of heterogeneous multidepartmental and international means of controlling outer space]. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> All-Russian scientific research conference «Issues of control of economic activity and financial audit, national security, system analysis and management»*. 2020. pp. 290-293. (in Russ.)

8. Gamishaev R.A., Kartsan I.N. [Radio navigation systems and their classification] *Materialy VII Vseross. nauch. konf. "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials VII All-Russian Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2011. pp. 293-295. (In Russ.)

© Карцан И. Н., 2022

УДК 621.396

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА БЮДЖЕТА КАНАЛА БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

С. Д. Креков<sup>1,2\*</sup>, Н. М. Боев<sup>1,2</sup>, А. В. Изотов<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

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38

E-mail: \*krkov00@bk.ru

*Приведен метод расчета бюджета канала ближнепольной магнитной цифровой системы связи, которая может быть использована для беспроводного энергоснабжения и управления механизмами на космических аппаратах.*

*Ключевые слова: ближнепольная магнитная связь, бюджет канала связи, беспроводное управление, беспроводное энергоснабжение, космический аппарат.*

## LINK BUDGET CALCULATION METHOD FOR NEAR-FIELD MAGNETIC COMMUNICATION SYSTEMS

S. D. Krekov<sup>1,2\*</sup>, N. M. Boev<sup>1,2</sup>, A. V. Izotov<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

E-mail: \*krkov00@bk.ru

*Near-field magnetic communication systems can be applied to wireless power transfer and wireless control of various actuators on spacecraft. In this paper we presented the link budget calculation method for these systems.*

*Keywords: magnetic link, link budget, wireless control, wireless power transfer, spacecraft.*

**Введение.** Системы, где беспроводная связь обеспечивается посредством магнитного поля, генерируемого передающей магнитной антенной, называются ближнепольными магнитными системами связи (БПМСС). Такие системы обладают рядом преимуществ [1] и могут быть использованы для беспроводного энергоснабжения [2] и управления различными механизмами космических аппаратов (КА).

**Метод расчета бюджета канала БПМСС.** В передатчиках БПМСС применяются индукционные антенны. Расчет магнитного поля, генерируемого такой антенной, может быть проведен по формулам Вернера [3]; электромагнитные параметры среды распространения учитываются в формуле волнового числа  $k$ :

$$H_r = \frac{k(kR)^2 I \cos \theta}{2i} e^{-ik\sqrt{r^2+R^2}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{2m-1} D_{ml}^2 \frac{\left[ \frac{(k^2 R r \sin \theta)/2}{(k\sqrt{r^2+R^2})} \right]^{2m-2}}{(k\sqrt{r^2+R^2})^{2m+l}}, \quad k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r + \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega}},$$

$$H_\theta = -\frac{k(kR)^2 I \sin \theta}{2i} e^{-ik\sqrt{r^2+R^2}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{2m-1} D_{ml}^2 \frac{\left[ \frac{(k^2 R r \sin \theta)/2}{(k\sqrt{r^2+R^2})} \right]^{2m-2}}{(k\sqrt{r^2+R^2})^{2m+l}} \left( 1 - \frac{r(2m+l+ik\sqrt{r^2+R^2})}{2m(r^2+R^2)} \right),$$

$$D_{ml}^2 = \frac{1}{(2i)^l} \frac{(2m+l-1)!}{(2m-l-1)!l!} \frac{(-1)^m}{[(m-1)!]^2},$$

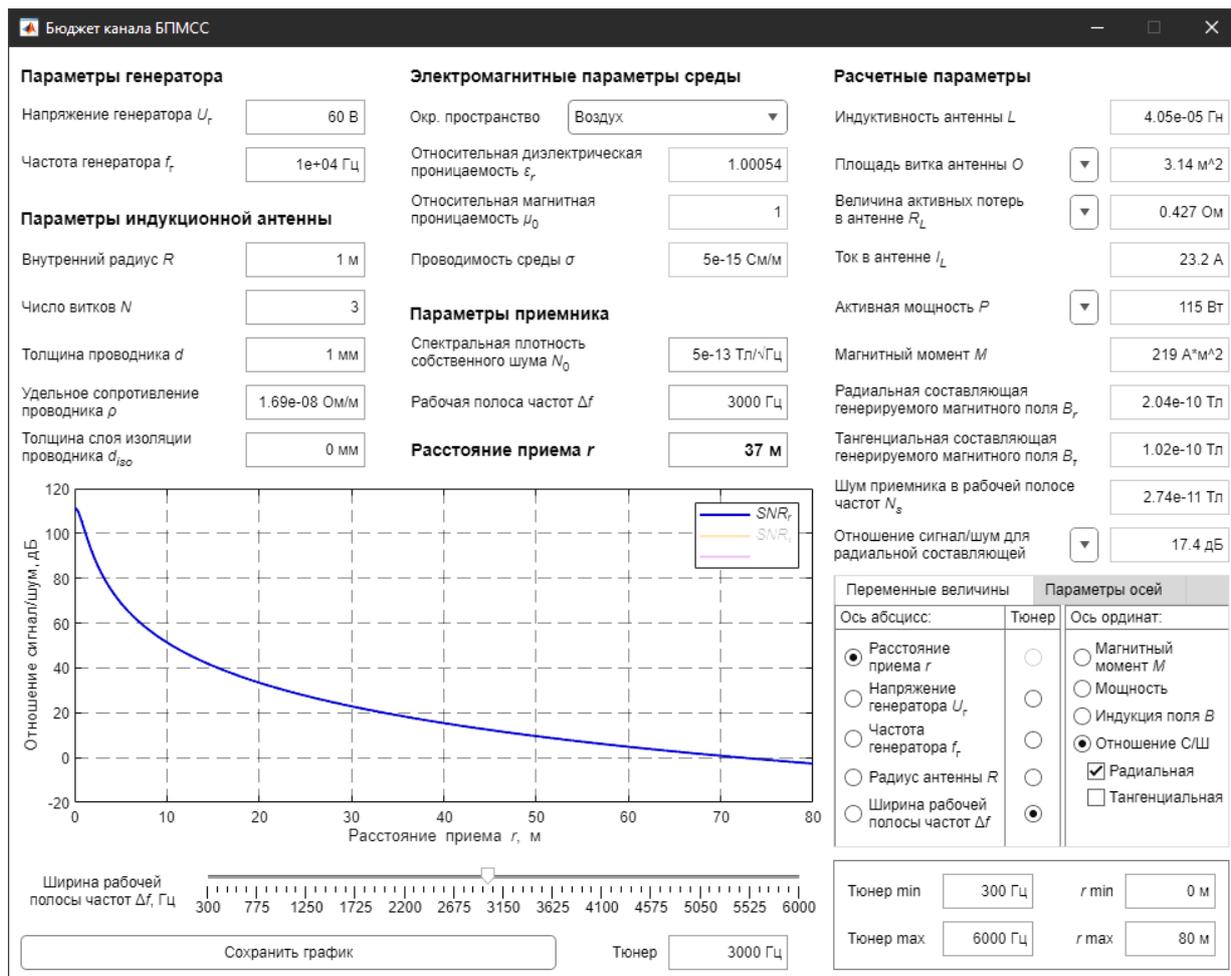
где  $R$  – радиус антенны, м;  $I$  – амплитуда тока в антенне, А;  $r$  – расстояние от антенны до заданной точки в пространстве, м;  $\theta$  – зенитный угол сферической системы координат, рад;  $\omega$  – циклическая частота тока в антенне, рад/с;  $c = 3 \cdot 10^8$  скорость свет, м/с;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\sigma$  – проводимость среды См/м.

Амплитуда тока в антенне при заданном напряжении источника может быть определена по закону Ома, исходя из индуктивности антенны и активных потерь в ней. Активные потери с учетом скин-эффекта и эффекта близости рассчитываются по формулам, приведенным в статье [4]. Индуктивность передающей антенны, которая является круглой катушкой с прямоугольным сечением, может быть определена по формуле (6–20) из справочника [5].

Помимо потерь в канале связи для оценки его бюджета необходимо определить источники помех. В космическом пространстве помехи создаются излучениями Солнца, Земли, солнечными ветрами, магнитосферой Земли, радиоэлектронной аппаратурой КА, к которым добавляются шумы приемной антенны.

Таким образом, по амплитудам сигнала и шумов возможно получить оценку отношения сигнал/шум на заданном расстоянии или оценить максимальную дальность связи при дополнительно заданных сигнальном созвездии и допустимом числе битовых ошибок.

**Программа расчета бюджета канала БПМСС.** Для автоматизации расчетов при первичной оценке параметров проектируемой БПМСС в среде MATLAB разработана соответствующая программа (см. рисунок).



Рабочее окно программы автоматизированного расчета бюджета канала БПМСС

На рисунке представлен пример расчета параметров БПМСС. При цифровой манипуляции 32-APSK [6] вероятность ошибок  $10^{-6}$  обеспечивается с отношением сигнал/шум 17,5 дБ. С таким уровнем максимальной дальность связи БПМСС составит  $\sim 37$  м при потребляемой передатчиком мощностью 115 Вт. Система связи может быть применена для беспроводного управления механизмами, размещенными на солнечных панелях международной космической станции, длина которых равна 35 м, или других КА. В случае малых расстояний между передатчиком и приемником возможна одновременная передача электрической энергии для функционирования одного или нескольких приемников (например, для опроса набора беспроводных датчиков, не имеющих собственных источников питания).

### Библиографические ссылки

1. Hott M., Hoehner P. A. Underwater communication employing high-sensitive magnetic field detectors // *Communications in Harsh Environments – IEEE Access*, 2020. Vol. 8, P. 177385–177394.
2. Design of high-power static wireless power transfer via magnetic induction: an overview / Zhand Y., Chen S., Li X. [et al.] // *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2021. Vol. 6, №4. P. 281–297
3. Werner H. An Exact Integration Procedure for Vector Potentials of Thin Circular Loop Antennas // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996. Vol. 44, №2. P. 157-165.
4. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity / Pellicer-Guridi R., Vogel M. V., Reutens D.C., Vegh V. // *Scientific Reports* 7, 2017. Article number: 2269. P. 12.
5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
6. Пат. 2738410 Российская Федерация, МПК H04B 5/02. Цифровой передатчик ближнепольной магнитной системы связи с амплитудно-фазовой манипуляцией / Боев Н. М., Креков С. Д., Изотов А. В. и др. № 2020121907; завл. 26.06.2020; опубл. 14.12.2020, Бюл. № 35.

### References

1. Hott M., Hoehner P. A. Underwater communication employing high-sensitive magnetic field detectors // *Communications in Harsh Environments – IEEE Access*, 2020. Vol. 8, P. 177385–177394.
2. Design of high-power static wireless power transfer via magnetic induction: an overview / Zhand Y., Chen S., Li X. [et al.] // *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2021. Vol. 6, №4. P. 281–297.
3. Werner H. An Exact Integration Procedure for Vector Potentials of Thin Circular Loop Antennas // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996. Vol. 44, №2. P. 157-165.
4. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity / Pellicer-Guridi R., Vogel M. V., Reutens D.C., Vegh V. // *Scientific Reports* 7, 2017. Article number: 2269. P. 12.
5. Kalantarov P. L., Tseytlin L. A. *Raschet induktivnostey: Spravochnaya kniga L.: Energoatomizdat*, 1986. P. 488.
6. *Tsifrovoy peredatchik blizhnepol'noy magnitnoy sistemy svyazi s amplitudno-fazovoy manipulyatsiey* / Boev N. M., Krekov S. D., Izotov A. V. [et al.]. Patent RF, no. 2738410, 2020.

© Креков С. Д., Боев Н. М., Изотов А. В., 2022

УДК 621.317.44

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО МАГНИТОМЕТРА**И. А. Негодеева<sup>1\*</sup>, Н. М. Боев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 28

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского, КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38

\*E-mail: inegodeeva@kirensky.ru

*Приводится методика расчета параметров индукционного магнитометра для нужд аэрокосмической техники.*

*Ключевые слова: индукционный магнитометр, расчет индуктивности, расчет потерь в индуктивности, аэрокосмическая техника.*

**PARAMETERS CALCULATION OF AN INDUCTION MAGNETOMETER**I. A. Negodeeva<sup>1\*</sup>, N. M. Boev<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Siberian Federal University

28, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

<sup>2</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

\*E-mail: inegodeeva@kirensky.ru

*A method for calculating the parameters of an induction magnetometer for the needs of aerospace technology is given.*

*Keywords: induction magnetometer, inductance calculation, inductance loss calculation, aerospace engineering.*

**Введение.**

Индукционные магнитометры являются одними из наиболее часто используемых детекторов магнитного поля и используются для решения самых разных задач, в том числе для измерений параметров магнитного поля Земли из космоса. Такие магнитометры обеспечивают высокую чувствительность, просты в изготовлении, надежны и имеют низкую стоимость [1–2]. Однако индукционные магнитометры должны быть адаптированы к условиям конкретного применения для достижения высокой чувствительности. По этой причине важно иметь возможность численного расчета и оптимизации параметров его катушки.

**Расчет параметров катушки индукционного магнитометра.**

Для многослойной катушки общее активное сопротивление переменному току может быть рассчитано следующим образом [3–4]

$$R_{S\_AC} = R_{S\_DC} \cdot \left( 1 - \frac{z^2}{8} \cdot \operatorname{Im} \left( \frac{J_3(z\sqrt{-i})}{J_1(z\sqrt{-i})} \right) - u(N) \cdot \frac{d_i^2}{d_0^2} \cdot \frac{z^2}{8} \cdot \operatorname{Im} \left( \frac{J_2(z\sqrt{-i})}{J_0(z\sqrt{-i})} \right) \right), \quad (1)$$

где  $d_i$  – внутренний диаметр провода (без изолирующего покрытия), м;  $d_0$  – расстояние между центрами проводов, м;  $u(N)$  – коэффициент, необходимый для поиска сопротивления вследствие вихре-

вых токов;  $J_n$  – функции Бесселя первого рода;  $R_{S\_DC}$  – сопротивление на постоянном токе, Ом;  $z$  – глубина скин-слоя, м:

$$z = \sqrt{\frac{d_i^2}{4} \cdot \frac{\omega \mu_0}{\rho_{copper}}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – циклическая частота, рад/с;  $\rho_{copper}$  – удельное сопротивление меди, Ом·м<sup>2</sup>/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м.

Функция  $u(N)$  зависит от величин радиусов отдельных витков, смещения по оси Z (вдоль оси катушки) для каждого провода и общего количества витков

$$u(N) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{r_j - r_i}{(r_j - r_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \right)^2 + \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{z_j - z_i}{(r_j - r_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $r$  – радиус отдельного витка, нормированный к расстоянию между слоями катушки, м;  $z$  – смещение витка вдоль оси Z, нормированное к расстоянию между слоями катушки, м;  $N$  – общее количество витков.

Полная индуктивность  $L_S$  получается путем суммирования собственной (4) и взаимной индуктивностей (5):  $L_S = L_0 + M_0$ . Вычисление  $L_0$  может быть выполнено следующим образом [4–5]

$$L_0 = \mu_0 \cdot \sum_{i=1}^N \left( 2r_i - \frac{d_i}{2} \right) \left[ \left( 1 - \frac{2 \cdot r_i \left( r_i - \frac{d_i}{2} \right)}{\left( 2r_i - \frac{d_i}{2} \right)^2} \right) \cdot K \left( \sqrt{\frac{4 \cdot r_i \left( r_i - \frac{d_i}{2} \right)}{\left( 2r_i - \frac{d_i}{2} \right)^2}} \right) - E \left( \sqrt{\frac{4 \cdot r_i \left( r_i - \frac{d_i}{2} \right)}{\left( 2r_i - \frac{d_i}{2} \right)^2}} \right) \right]. \quad (4)$$

Взаимная индукция может быть найдена аналогичным способом

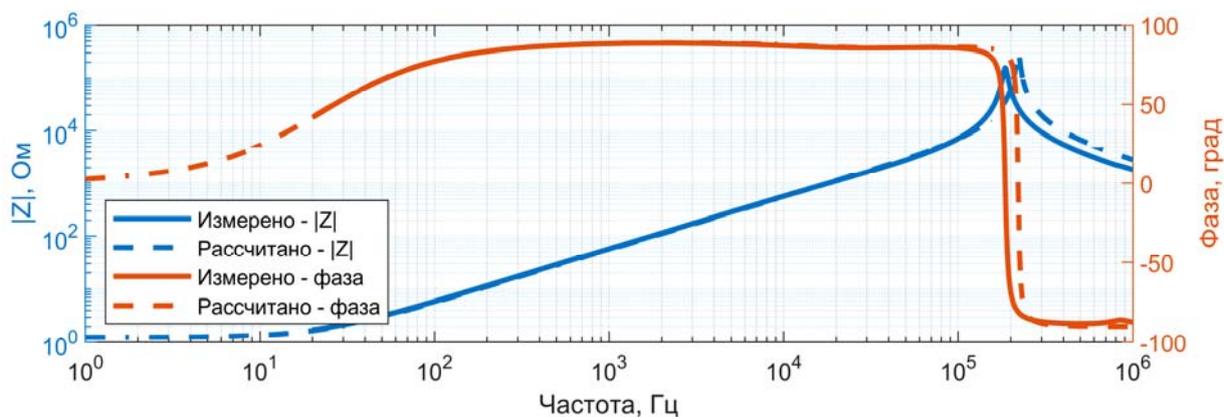
$$M_0 = 2\mu_0 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\sqrt{r_i - r_j}}{k_{i,j}} \times \left[ \left( 1 - \frac{2r_i r_j}{(r_i + r_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \right) \cdot K \left( \sqrt{\frac{4r_i r_j}{(r_i + r_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} \right) - E \left( \sqrt{\frac{4r_i r_j}{(r_i + r_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} \right) \right]. \quad (5)$$

Паразитная емкость обмотки определяется следующим выражением [5]

$$C_S = \frac{8\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot (N_V d_0 + (N_V - 1) \xi_z) (N_L - 1)}{6N_L^2 (1,26d_0 - 1,15d_i)} \cdot [2r_{in} + d_0], \quad (6)$$

где  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость слоя покрытия, Ф/м;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $r_{in}$  – внутренний радиус катушки, м;  $\xi_z$  – расстояние между проводниками вдоль оси Z, м;  $N_L$  – количество слоев;  $N_V$  – количество витков на слой.

Для подтверждения корректности формул была намотана круглая катушка с прямоугольным сечением. Параметры катушки: тип провода – ПЭТВ–2; диаметр  $d_i = 1,25$  мм; внутренний диаметр катушки  $d_{in} = 80$  мм; внешний диаметр катушки  $d_{out} = 116$  мм; количество слоев  $N_L = 16$ ; количество витков на слой  $N_V = 18$ , расстояние между центрами проводов  $d_o = 1,36$  мм. На рисунке 1 приведены результаты теоретического расчета по формулам (1–6) и результаты измерений импеданса катушки с использованием прибора Keysight E4990A. Наблюдается хорошее согласие теории и эксперимента.



Комплексное сопротивление катушки измерено прибором Keysight E4990A и получено теоретически

### Библиографические ссылки

1. Афанасьев Ю. В., Студенцов В. Н., Чечурина Е. Н. [и др.]. Средства измерений параметров магнитного поля / Ленингр. отд-ние, 1979. – 320 с.
2. Antenna engineering handbook third edition / Richard C. Johnson // McGraw-Hill, 1993. – 1392.
3. Savukov, I., Seltzer, S. / Romalis, M. Detection of NMR signals with a radio-frequency atomic magnetometer. *Journal of Magnetic Resonance* 185, 214–220, doi:10.1016/j.jmr.2006.12.012 (2007).
4. Pellicer-Guridi, R. Vogel, M. W. Reutens, D. C. Vegh, V. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity. *Scientific Reports*. – 2017, 1–12, DOI:10.1038/s41598-017-02099-z.
5. Martinez, J. L., Babic, S. Akyel, C. On Evaluation of Inductance, DC Resistance, and Capacitance of Coaxial Inductors at Low. Frequencies. *Magnetics*. – 2014, *IEEE Transactions on* 50, 1–12, DOI:10.1109/TMAG.2014.2303943.

### References

1. Afanas'ev Yu. V., Studencov V. N., Chechurina E. N. [i dr.]. *Sredstva izmerenij parametrov magnitnogo polya / Leningr. otd-nie, 1979. – 320 s.*
2. *Antenna engineering handbook third edition / Richard C. Johnson // McGraw-Hill, 1993. – 1392.*
3. Savukov, I., Seltzer, S. / Romalis, M. Detection of NMR signals with a radio-frequency atomic magnetometer. *Journal of Magnetic Resonance* 185, 214–220, doi:10.1016/j.jmr.2006.12.012 (2007).
4. Pellicer-Guridi, R. Vogel, M. W. Reutens, D. C. Vegh, V. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity. *Scientific Reports*. – 2017, 1–12, DOI:10.1038/s41598-017-02099-z.
5. Martinez, J. L., Babic, S. Akyel, C. On Evaluation of Inductance, DC Resistance, and Capacitance of Coaxial Inductors at Low. Frequencies. *Magnetics*. – 2014, *IEEE Transactions on* 50, 1–12, DOI:10.1109/TMAG.2014.2303943.

© Негодеева И. А., Боев Н. М., 2022

УДК 621.3

## СЕНСОРНЫЕ СЕТИ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATtiny13

М. С. Федоров, А. Д. Широков, Д. А. Феоктистов, 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: mixail.fedorov.00@mail.ru

*Целью исследования являлось определение особенностей проектирования беспроводных сетей на базе ATtiny13, для достижения которой было необходимо решить задачи ввода, обработки, передачи и приема данных.*

*Ключевые слова: интернет-технологий, протоколы беспроводной передачи данных, проектирование сетей*

## SENSOR NETWORKS BASED ON THE ATtiny13 MICROCONTROLLER

M. S. Fedorov, A. D. Shirokov, D. A. Feoktistov, A. V. Smirnov, T. G. Oreshenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mixail.fedorov.00@mail.ru

*The purpose of the study was to determine the design features of wireless networks based on ATtiny13, to achieve which it was necessary to solve the problems of input, processing, transmission and reception of data.*

*Keywords: Internet of Things, network design, network layer protocols*

Тема интернета вещей посвящена не только организации умного дома. Существует множество устройств, не объединенных такой сетью, и их объединение в экосистему интернета вещей требует создания цифровых интерфейсов, причем, как правило, беспроводных. Также простая установка *Wi-Fi* или *Bluetooth* в каждое устройство не решает проблемы, ввиду ряда ограничений, накладываемых используемыми протоколами, таких как низкая пропускная способность сети, дальность взаимодействия, сложность топологии, необходимость энергосбережения.

Так на сегодняшний день известны такие стандарты беспроводной связи как *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *ZigBee*, *Z-Wave*, *Thread*, *DeCT-ULE*, *EnOcean*, *6LowPan*, *NFC*, *ANT/ANT+*, *WirelessHART*, *RF433* и другие. Обратимся к примеру реализованной коллективом авторов сенсорной сети на *ATtiny13* из базы-приемника и нескольких передатчиков *FS1000A*. Особенность приемника и передатчиков в том, что они работают на частоте 433 МГц и используют амплитудную модуляцию. Амплитудная модуляция проста в реализации и при ее использовании требуется меньшая полоса пропускания, чем при других методах модуляции. Подобные *RF433* передатчики дешевле, однако их недостатком является низкая помехозащищенность. Так пара из приемника и передатчика *SYN113/SYN115* позволила осуществить связь лишь на расстояниях до 1 метра.

Схемы реализации сенсорной сети приведены на рисунке 1.

Обработка сигнала от цифрового датчика температуры производилась по вновь разработанному алгоритму, листинг которого приводится ниже, был разработан метод подсчета байтов. Одной из особенностей кода датчиков является сложность реализации таймера на *ATtiny13*. В рассмотренном примере реализация таймера выполнены с помощью команды *delay*.

В рамках работы установлены особенности проектирования и отладки сенсорной сети интернета вещей на базе приемо-передающих устройств *FS1000A*. Технология позволяет производить беспроводной обмен данными на расстоянии до 25 метров без препятствий и с препятствиями (в виде кирпичной стены) до 10 м. Выявлены особенности работы сети при зашумленности эфира работой смежных устройств.

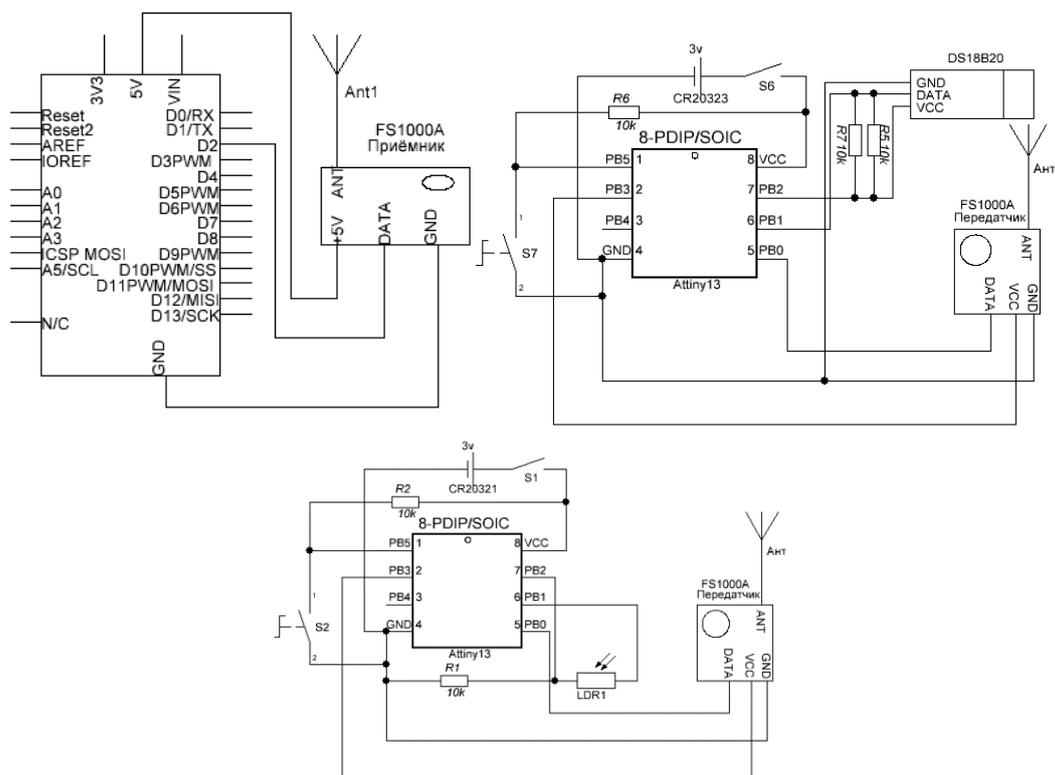


Схема реализации сенсорной сети

### Библиографические ссылки

1. Arduino и термометр DS18B20. Сайт – URL: <https://kit.alexgyver.ru/tutorials/ds18b20/> (дата обращения: 05.03.2022). – Текст: электронный.
2. Подключение кнопки к Arduino. Gyverbutton V3.8. Сайт – URL: <https://alexgyver.ru/gyverbutton/> (дата обращения: 10.04.22). – Текст: электронный.
3. Фоторезистор и Arduino. Сайт – URL: <https://arduino-diy.com/arduino-fotorezistor> (дата обращения: 05.04.22). – Текст: электронный.
4. Attiny13. Сайт – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/138/DOC012138501.pdf> (дата обращения: 05.05.22). – Текст: электронный.
5. Обзор радиомодуля на FS1000A (RF-5V). – URL: <https://robotchip.ru/obzor-radiomodulya-na-fs1000a-rf-5v/> (дата обращения: 05.05.22). – Текст: электронный.
6. Программаторы, ISP, Фьюзы. Сайт – URL: <https://alexgyver.ru/lessons/programmer-tips/> (дата обращения: 05.03.22). – Текст: электронный.

### References

1. Arduino i termometr DS18B20. Sajt – URL: <https://kit.alexgyver.ru/tutorials/ds18b20/> (data obrashcheniya: 05.03.2022). – Tekst: elektronnyj.
2. Podklyuchenie knopki k Arduino. Gyverbutton V3.8. Sajt – URL: <https://alexgyver.ru/gyverbutton/> (data obrashcheniya: 10.04.22). – Tekst: elektronnyj.
3. Fotorezistor i Arduino. Sajt – URL: <https://arduino-diy.com/arduino-fotorezistor> (data obrashcheniya: 05.04.22). – Tekst: elektronnyj.
4. Attiny13. Sajt – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/138/DOC012138501.pdf> (data obrashcheniya: 05.05.22). – Tekst: elektronnyj.
5. Obzor radiomodulya na FS1000A (RF-5V). Sajt – URL: <https://robotchip.ru/obzor-radiomodulya-na-fs1000a-rf-5v/> (data obrashcheniya: 05.05.22). – Tekst: elektronnyj.
6. Programmatory, ISP, F'yuzy. Sajt – URL: <https://alexgyver.ru/lessons/programmer-tips/> (data obrashcheniya: 05.03.22). – Tekst: elektronnyj.

УДК 629.7.054.847

## ОТРАБОТКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СПУТНИКОВ СВЯЗИ

А. К. Шатров, Е. Н. Фисенко, О. И. Рабецкая

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

*Рассмотрена отработка теплового режима спутников связи при тепловакуумных испытаниях*

*Ключевые слова: космический аппарат, тепловакуумные испытания, тепловой режим.*

## TESTING OF THE THERMAL REGIME OF COMMUNICATION SATELLITES

A. K. Shatrov, E. N. Fisenko, O. I. Rabetskaya

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

*The development of the thermal regime of communication satellites during thermal vacuum tests is considered*

*Keywords: spacecraft, thermal vacuum tests, thermal regime.*

Обеспечение теплового режима космического аппарата заключается в поддержании температур основных элементов конструкции, приборов, агрегатов, радиоэлементов, газовой и жидкой сред в герметичных контейнерах и системах в заданных диапазонах.

Нарушение теплового режима приводит, как правило, к отказам аппаратуры и невозможности выполнения задач, возлагаемых на космический аппарат связи по целевому назначению.

В связи с увеличением продолжительности срока активного существования, потребляемой электрической мощности при одновременном повышении требований к снижению относительной массы, возрастают требования и к система терморегулирования, что усложняет задачи, которые необходимо решать на всех этапах создания новых спутников связи. При этом необходимо учитывать деградацию теплофизических параметров материалов в условиях воздействия факторов космического пространства (радиации, вакуума, высоких и низких температур, цикличность их изменений).

Для того, чтобы спроектировать систему терморегулирования космического аппарата связи, отвечающую предъявляемым к ней требованиям, одним из важнейших условий является возможность проведения современными вычислительными средствами большого объема расчетов температурных полей для условий переменных воздействий внутренних и внешних тепловых нагрузок на составные части спутника и спутник в целом, в условиях эксплуатации на орбите.

Не менее сложной является задача обеспечения теплового режима космического аппарата при наземных испытаниях. Сложными являются также задачи экспериментальной наземной отработки теплового режима, как отдельных узлов, так и космического аппарата в целом с имитацией условий, максимально приближенных к условиям штатной эксплуатации на орбите.

Значительный объем работ, по обеспечению теплового режима спутников связи, выполняется также в части имитации условий космического пространства в процессе различного рода испытаний в термобарокамере по созданию и применению экранно-вакуумной теплоизоляции, отработке стойкости оптических покрытий, материалов с различной теплопроводностью, проверке работоспособности агрегатов системы терморегулирования (гидроблоков, вентиляторов, терморегуляторов), а также устройств и оборудования для заправки теплоносителями замкнутых гидравлических и газовых контуров, электронной аппаратуры и т. д.

Сложность наземной отработки спутников связи связана с трудностями имитации реальных космических условий его эксплуатации: глубокого вакуума, невесомости, внешних тепловых потоков от Солнца, от Земли.

Для отработки теплового режима на полномасштабном макете спутника требуется термобарокамера с имитатором солнечного теплового потока. Такое испытательное оборудование в десятки раз превышает размеры спутника, является сложным и дорогостоящим. Такие испытания называются тепловакуумными. Этапу наземной отработки предшествуют всесторонние тепловые расчеты отдельных составных частей спутника и спутника в целом. Для подготовки к проведению тепловакуумным испытаниям на этапе эскизного проектирования составляется план наземной экспериментальной отработки узлов, агрегатов, систем и спутника в целом. При этом определяется количество и состав полномасштабных отработочных макетов, необходимого испытательного оборудования и специализированного места проведения испытаний.

Так как многие российские спутники, имеют в своем составе герметичный контейнер, заполненный газом, то наиболее целесообразной для них явилась активная газожидкостная, с заданными расходонарными характеристиками по жидкому и газовому теплоносителям, связанным между собой в тепловом отношении посредством газожидкостного теплообменника. На полномасштабных тепловых макетах спутников устанавливаются соответствующие штатные газожидкостная система терморегулирования.

При проведении тепловакуумных испытаниях, наряду с отработкой тепловых режимов спутника, его систем и внешних элементов, обрабатывается также и система терморегулирования, работа ее автоматики по регулированию температур в заданных диапазонах в различных условиях функционирования, переход на резервные комплекты агрегатов системы, проверка их работоспособности, а также отработка электронных схем управления электронасосных агрегатов, вентиляторов и электрообогревателей. В термобарокамере обеспечивается низкое давление, имитирующее то, какое космический аппарат испытывает в открытом космосе,  $1 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст, минимальные температуры не выше минус 180 °С, для чего применяются низкотемпературные азотные экраны. Для имитации переменных тепловых потоков от Солнца на различные стороны спутника применяют специальное поворотное устройство, с помощью которого имитируют вращение спутника относительно направления теплового потока от солнечного имитатора и таким образом проводят отработку тепловых режимов в условиях, максимально приближенных к условиям натурной эксплуатации спутника. За счет этого достигается высокое качество и надежность отработки тепловых режимов спутника в наземных условиях.

Тепловакуумные испытания являются очень дорогостоящими, проведение испытаний по полной программе проводятся круглосуточно в течении нескольких месяцев и несут большие энергетические затраты.

Современные достижения в точности методик по расчету температурных полей больших и сложных спутников, в быстроте проведения больших объемов расчетов по их тепловым режимам и их составным частям с применением развитого парка современных вычислительных машин позволили перейти и осуществить новую концепцию проведения тепловакуумных испытаний. Суть новой концепции заключается в проведении только стационарных тепловых режимов в условиях максимальных и минимальных тепловых нагрузок на спутник в целом и его отдельные внешние элементы с последующим обеспечением сходимости результатов испытаний с расчетными результатами. А подтверждение промежуточных требований по обеспечению заданных тепловых режимов осуществляют расчетным путем. Это позволяет значительно сократить сроки наземной тепловой отработки спутника и снизить финансовые затраты.

### Библиографические ссылки

1. Анкудинов А. В. Использование математических моделей и методов анализа для определения проектного облика КА связи на ранних этапах жизненного цикла //Тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции "Решетневские чтения". - Вып.1.-Красноярск: САА, 1997г.-с.74.
2. Шатров А. К. Термоструктурный анализ антенных блоков. Науч.-тех. отчет 33-1811-85// Красноярск: НПО ПМ,1985.-80 с.
3. Шатров А. К. Расчет температурных деформаций бериллиевой плиты, Технический отчет 33-3619-88// Красноярск: НПО ПМ,1988.-62 с.

4. Шатров А. К., Пискунов В. Г., Сипетов В. С. Экспериментально-теоретическое исследование ребристых пологих оболочек в стационарном температурном поле //Тез.докл. Всесоюзный симпозиум "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии.-Киев.-1984.-ч.11.,С. 39.

5. К. Г. Смирнов-Васильев. В. В. Двирный, Г. И. Овечкин, Г. И. Панов. Моделирование характеристик тепловых труб при расчете нестационарных температурных полей конструкций с тепловыми трубами. Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения качества изделий в машиностроении». Красноярск, сентябрь 1994.с.462-468.

### References

1. Ankudinov A. V. The use of mathematical models and analysis methods to determine the design appearance of the spacecraft at the early stages of the life cycle //Abstracts of reports of the All-Russian scientific and technical conference "Reshetnev readings".- Issue 1.-Krasnoyarsk: CAA, 1997.-p.74.

2. Shatrov A. K. Thermostructural analysis of antenna blocks. Sci.-tech. report 33-1811-85// Krasnoyarsk: NPO PM, 1985.-80 p.

3. Shatrov A. K. Calculation of temperature deformations of beryllium plate, Technical report 33-3619-88// Krasnoyarsk: NPO PM, 1988.-62 p.

4. Shatrov A. K., Piskunov V. G., Sipevov V. S. Experimental and theoretical study of ribbed flat shells in a stationary temperature field //Tez.dokl. All-Union Symposium "Strength of materials and structural elements in a complex stress state.-Kiev.-1984.-part 11., p. 39.

5. K. G. Smirnov-Vasiliev. V. V. Dvirny, G. I. Ovechkin, G. I. Panov. Modeling the characteristics of heat pipes in the calculation of non-stationary temperature fields of structures with heat pipes. Collection

© Шатров А. К., Фисенко Е. Н., Рабецкая О. И., 2022



**Секция**

**«КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»**

УДК 629.78

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ИМИТАТОРОВ  
ТРАФИКА SPACEWIRE ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

А. С. Максютин\*, Д. С. Казайкин, Д. В. Дымов

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: Ellis1998@yandex.ru

*Согласно классификации испытаний по взаимосвязи исследуемых объектов выделяют автономные и комплексные виды испытаний. В рамках данной статьи рассматривается тестирование бортовой аппаратуры SpaceWire в составе комплекса, функционал которого реализуется при помощи имитационного моделирования.*

*Ключевые слова: космические аппараты, бортовая аппаратура, программное моделирование, испытательные стенды, SpaceWire.*

**DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND HARDWARE SIMULATORS  
OF SPACEWIRE TRAFFIC FOR TESTING THE ONBOARD EQUIPMENT  
OF SPACECRAFT**

A. S. Maksyutin\*, D. S. Kazaykin, D. V. Dymov

Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»  
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: Ellis1998@yandex.ru

*Autonomous and complex types of tests are determined by the interrelation of the studied objects. Within the framework of this article, testing of SpaceWire onboard equipment is considered as part of a complex, the functionality of which is implemented using simulation modeling.*

*Keywords: spacecraft, onboard equipment, software modeling, test benches, SpaceWire.*

SpaceWire – это технология передачи данных на борту космического аппарата (КА), позволяющая обеспечить высокие скорости передачи информации, малые задержки доставки сообщений, устойчивость к отказам и сбоям, низкое энергопотребление, поддержку систем реального времени и системных функций бортовых комплексов [1]. Таким образом, на сегодняшний день технология SpaceWire отвечает всем требованиям для эксплуатации в составе бортовых космических систем, в связи с чем она быстро получила распространение на зарубежных КА [2]. В отечественной космонавтике данная технология признана перспективной и происходит поэтапное внедрение.

Одним из важных этапов разработки новой продукции космической отрасли является верификация и отработка. В связи с этим параллельно с разработкой аппаратуры, алгоритмов и программного обеспечения разрабатываются средства и методики испытаний, позволяющие достаточно полно и тщательно испытать новую продукцию на соответствие предъявляемым к ней требованиям [3].

Существуют различные классификации испытаний бортовой аппаратуры КА. В рамках данной статьи предлагается рассмотреть классификацию по взаимосвязи испытываемых объектов:

1. Автономные испытания на соответствие требованиям стандарта. В случае, рассматриваемом в данной статье, стандарта SpaceWire – ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 [4].

2. Комплексные испытания на соответствие требованиям, предъявляемым к оборудованию как к элементу системы, комплекса, в котором ему предстоит функционировать [4].

В рамках данной статьи рассматриваются комплексные испытания. Данный вид испытаний имеет более специализированный характер по сравнению с автономными испытаниями. Причиной этому является то, что системы и комплексы, в которых предстоит функционировать вновь разработанному оборудованию SpaceWire, отличаются по своей структуре, функционалу и допускам.

Этот факт делает предпочтительным применение метода испытаний основанного на использовании программно-аппаратного моделирования. Это обуславливается тем, что использование имитаторов бортовой аппаратуры, позволяет в значительной мере сократить затраты времени и ресурсов. Программная составляющая подобных имитаторов также позволяет промоделировать сложно воспроизводимые ситуации в физических экспериментах. А минимизация нежелательных внешних факторов позволяет обеспечивать более высокую точность испытаний.

Основной концепцией представляемой работы является разработка и реализация программно-аппаратных имитаторов трафика SpaceWire для испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. Данные имитаторы должны обеспечивать возможность генерации пакетов SpaceWire, а также пакетов транспортных протоколов, реализованных поверх SpaceWire, таких как RMAP [5] и СТП-ИСС [6]. Данная имитация должна происходить таким образом, чтобы можно было оценить возможность работы испытываемой аппаратуры SpaceWire в условиях, сходных с реальными условиями дальнейшей эксплуатации данной аппаратуры.

В связи с этим имитаторы трафика должны иметь гибкую настройку, которая может быть достигнута путем задания следующих параметров:

1. Формат структуры пакетов.
2. Типы пакетов.
3. Количество пакетов.
4. Длины полей данных.
5. Периоды отправок.
6. Задержки перед отправкой.
7. Путевые и логические адреса.

После выбора конечного числа и типа имитаторов трафика, а также задания вышеуказанных настроек испытываемое оборудование может быть подключено к данному программно-аппаратному комплексу, и его работа может быть исследована.

Ко всему прочему для повышения уровня визуализации и удобства использования данного программного комплекса планируется реализация графического пользовательского интерфейса.

На сегодняшний день данная работа находится в состоянии разработки алгоритмов функционирования имитаторов трафика, а также их программной реализации. Активно прорабатываются и дополняются опции настройки разрабатываемых имитаторов.

Также запланировано создание ряда тестовых сценариев для разработанных имитаторов. Данные сценарии представляют собой некоторые заранее подготовленные настройки для каждого имитатора трафика, которые позволяют им моделировать работу контроллеров служебных систем определенного КА, на котором планируется использование бортовой аппаратуры SpaceWire.

Данная разработка является одной из частей работы по созданию стенда тестирования бортовой аппаратуры SpaceWire с возможностью программного и аппаратного моделирования реконфигурируемой топологии бортовой сети КА.

### Библиографические ссылки

1. Шейнин Ю., Солохина Т., Петричкович Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределительных комплексов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 1. С. 38–49.
2. Дымов Д. В., Двирный В. В., Еременко Н. В. Перспективы применения сетевой технологии SpaceWire на российских спутниках // Решетневские чтения. 2015. №1. С. 105-103.
3. Голубев Е.Н., Николаев А.О. Развитие и совершенствование методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата // Вестник сибирского государственного университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 2. С. 128-132.
4. ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.

5. Remote memory access protocol (normative) [Электронный ресурс]. URL: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWire%20RMAP%20Protocol%20Draft%20F%204th%20Dec%202006.pdf> (дата обращения: 05.03.2022).

6. Шейнин Ю. Е., Оленев В. Л., Лавровская И. Я., Дымов Д. В., Кочура С. Г. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire // Исследования наукограда. 2014. №. 1-2. С. 21–30.

### References

1. Sheinin Yu., Petrichkovich Ya., Solokhina T. [SpaceWire technology for parallel systems and on-board distribution complexes]. *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes*. 2007, No. 1. pp. 38–49. (In Russ).

2. Dymov D. V., Dvirnyj V. V., Eremenko N. V. [Prospects for the use of SpaceWire network technology on Russian satellites]. *Reshetnevskie chteniya*. 2015. No 1. pp. 105-103 (In Russ).

3. Golubev E.N., Nikolaev A.O. [Development and improvement of the methodology of bench tests of the onboard control system of the spacecraft]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*. 2013. No 2. pp. 128-132 (In Russ).

4. ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.

5. Remote memory access protocol (normative). Available at: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWire%20RMAP%20Protocol%20Draft%20F%204th%20Dec%202006.pdf> (accessed: 05.06.2022).

6. Sheinin Yu. E., Olenov V. L., Lavrovskaya I. Ya., Dymov D.V., Kochura S.G. [Development, analysis and design of the STP-ISS transport protocol for SpaceWire onboard space networks]. *Issledovaniya naukograda. Zheleznogorsk*. 2014, No. 6–2, P. 632–639 (In Russ.).

© Максютин А. С., Казайкин Д. С., Дымов Д. В., 2022

УДК 621.314.1

## ДВУКРАТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Н. А. Севостьянов\*, Р. Л. Горбунов

Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20  
E-mail: \*n.sevostyanov97@yandex.ru

*В работе решается проблема быстродействующего цифрового управления с запаздыванием параллельно-соединёнными силовыми преобразовательными модулями в системе электроснабжения космического аппарата путём организации физически и функционально распределённого двукратного регулирования напряжения.*

*Ключевые слова: система электроснабжения, космический аппарат, силовой полупроводниковый преобразователь, цифровое управление.*

## DOUBLE VOLTAGE CONTROL IN A SPACECRAFT POWER SYSTEM WITH A DIGITAL CONTROL SYSTEM

N. A. Sevostyanov\*, R. L. Gorbunov

Novosibirsk State Technical University  
20, Karl Marx prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
E-mail: \*n.sevostyanov97@yandex.ru

*The paper solves a problem of fast-response digital control with delay by parallel power converter modules in a spacecraft power system by organizing physically and functionally distributed double voltage control.*

*Ключевые слова на английском языке: power system, spacecraft, power converter, digital control.*

В типовом исполнении 1-й уровень управления первичной системой электроснабжения (СЭС) космического аппарата (КА) (рис. 1) содержит подсистему регулирования внутреннего тока силовых преобразовательных модулей (СПМ) (например, тока реактора); 2-й уровень – подсистему стабилизации напряжения общей шины электроснабжения (ОШЭ), задающую уставку внутреннего тока через интерфейс связи с запаздыванием на период обмена информацией  $T_{\text{смм}}$ . В ситуации быстродействующего управления через низкоскоростной интерфейс связи, когда частота среза подсистемы стабилизации напряжения ОШЭ  $\omega_{\text{ншэ}}$  и  $T_{\text{смм}}$  высоки, система с запаздыванием способна потерять устойчивость согласно критерию Найквиста (рис. 2, а) [1]. Разработка высокоскоростных интерфейсов с малым  $T_{\text{смм}}$  для повышения быстродействия управления — проигрышный в долгосрочной перспективе или даже тупиковый подход, поскольку полностью зависит от темпа и предела развития технологий связи и лишь отсрочивает действительное решение проблемы.

Переход от централизованной стабилизации напряжения ОШЭ к полностью децентрализованному регулированию выходных напряжений СПМ для решения вышеописанной проблемы вынуждает управлять СПМ с наклоном внешней характеристики (НВХ, droop control) для равномерного токораспределения между параллельно-соединёнными СПМ [2]. В космических системах такое управление неприменимо: для примера, в системе с номинальным напряжением 100 В и отклонением напряжения  $\pm 1\%$  для СПМ мощностью 2 кВт угловой коэффициент НВХ составит 100 мОм, а международный стандарт ECSS-E-ST-20C [3] ограничивает относительный импеданс СПМ на нулевой частоте на уровне 0,2 %, что при тех же параметрах составит 10 мОм, – приведённые величины малы и со-

поставимы с активным сопротивлением бортовой кабельной сети, что не позволяет применять полностью децентрализованное управление с НВХ для СЭС КА.

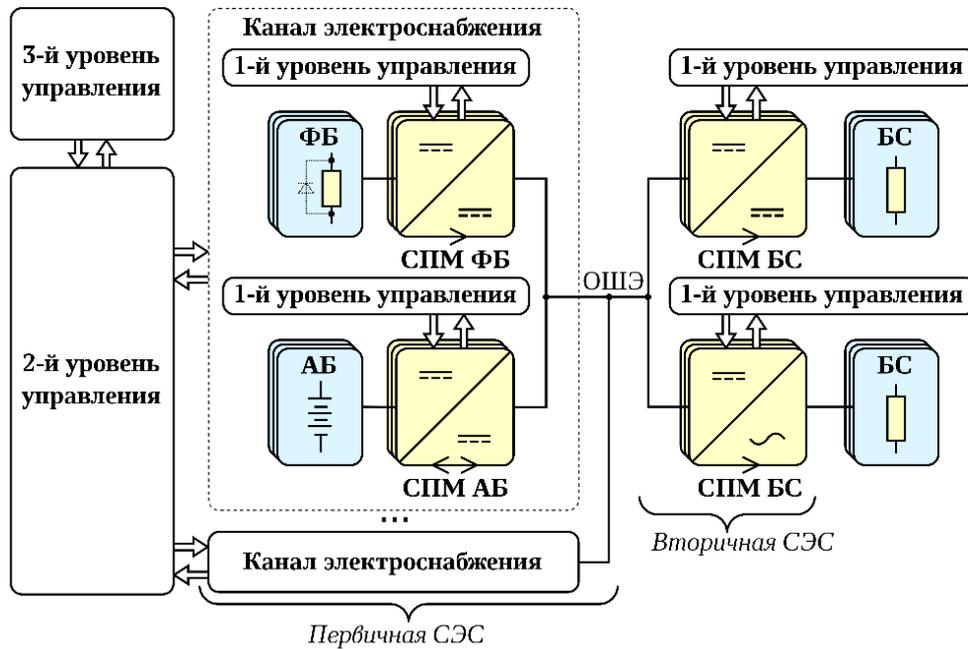


Рис. 1. Функциональная схема СЭС КА с иерархическим управлением

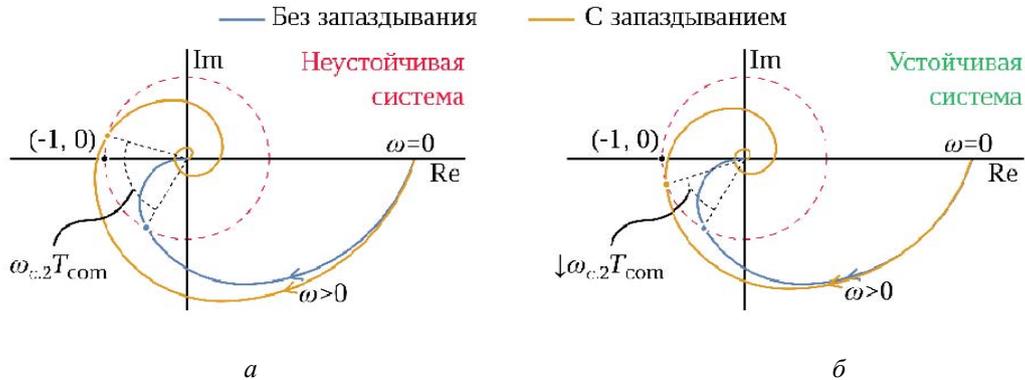


Рис. 2. Годограф Найквиста при различных  $\omega_c \cdot 2 \cdot T_{com}$

В работе предлагается реализовать двукратное регулирование напряжения по аналогии с двукратно интегрируемым регулированием скорости электропривода [4], распределённое на 2-х уровнях: 1-й уровень содержит децентрализованные подсистемы быстродействующего регулирования внутреннего тока и выходного напряжения СПМ с НВХ; 2-й уровень – централизованную подсистему медленнодействующей стабилизации напряжения ОШЭ, компенсирующую статическое отклонение напряжения заданием уставки выходного напряжения СПМ через интерфейс связи. При таком управлении реализуются преимущества как централизованных, так и децентрализованных систем, а  $\omega_c \cdot 2 \cdot T_{com}$  выбирается низкой, снижая требования к пропускной способности интерфейсов связи (рис. 2, б).

Экспериментально доказывается возможность сохранения качества стабилизации напряжения ОШЭ, установленного типовыми для КА требованиями, при снижении скорости информационного обмена между 1-м и 2-м уровнями управления посредством применения предлагаемой структуры системы управления.

### Библиографические ссылки

1. Воронов А. А., Бабаков Н. А. Теория автоматического управления. Часть I. Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.
2. DC Microgrids – Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques / T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasques, J. M. Guerrero // IEEE Transactions on Power Electronics, 2015. Vol. 31. P. 4876-4891.
3. ECSS-E-ST-20C. Space engineering. Electrical and electronic // ECSS Standard, 2017.
4. Шрейнер Р. Т. Системы подчинённого регулирования электроприводов. Екатеринбург: изд-во ГОУ ВПО “Рос. гос. проф.-пед. ун-т”, 2008, 279 с.

### References

1. Voronov A. A., Babakov N. A. *Teorija avtomatičeskogo upravljenja. Čast' I. Teorija linejnyh sistem avtomatičeskogo upravljenja* [Theory of automatic control. Part I. Theory of linear automatic control systems]. Moscow: Vyssh. shk., 1986. p. 367.
2. DC Microgrids – Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques / T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasques, J. M. Guerrero // IEEE Transactions on Power Electronics, 2015. Vol. 31. p. 4876-4891.
3. ECSS-E-ST-20C. Space engineering. Electrical and electronic // ECSS Standard, 2017.
4. Shrejner R. T. *Sistemy podchinjonnoho regulirovanija jelektroprivodov* [Systems of subordinate regulation of electric drives]. Ekaterinburg: izd-vo GOU VPO “Ros. gos. prof.-ped. un-t”, 2008, p. 279.

© Севостьянов Н. А., Горбунов Р. Л., 2022

УДК 004.3'144

## ПОСТРОЕНИЕ БОРТОВОЙ АВИОНИКИ НАНОСПУТНИКА RESHUCUBE-1

А. В. Шахматов, В. Х. Ханов\*

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

*В работе представлены проектные решения по построению бортовой авионики наноспутника ReshUCube-1, являющейся примером распределенной шинной архитектуры. Бортовая авионика основана на шине CAN и имеет два основных бортовых контроллера: платформы и полезной нагрузки.*

*Ключевые слова: наноспутники, бортовая авионика, шинная архитектура.*

## CONSTRUCTION OF ONBOARD AVIONICS OF A NANOSATELLITE RESHUCUBE-1

A. V. Shakhmatov, V. Kh. Khanov\*

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

*The paper presents design solutions for the construction of onboard avionics of the nanosatellite ReshUCube-1, which is an example of a distributed bus architecture. Onboard avionics is based on the CAN bus and has two main onboard controllers: platform and payload.*

*Keywords: nanosatellites, onboard avionics, bus architecture.*

Бортовая авионика космического аппарата ReshUCube является примером распределенной архитектуры (см. рисунок). Данный вариант построения авионики определен производителем платформы (П): компанией Спутникс [1].

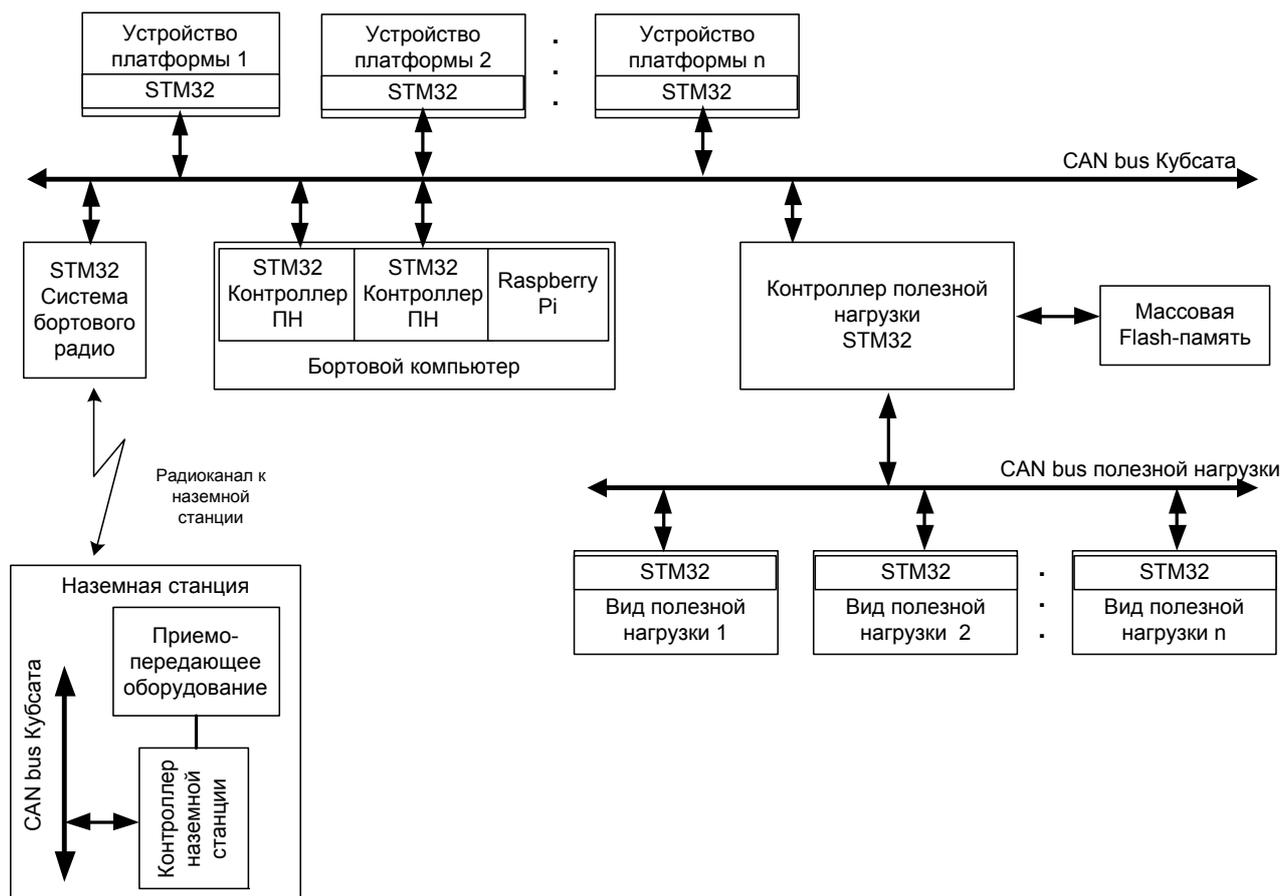
Системообразующим элементом является шина CAN [2]. CAN является сетью контроллеров, которые подключают к сети устройства П и полезной нагрузки (ПН). «Поверх» шины CAN используется протокол UniCAN, обеспечивающий явную адресацию узлов сети. В этой сети узлами с отдельными адресами являются и наземная станция и в целом вся ПН.

В качестве контроллеров узлов сети используются STM32 [3], которые не только обеспечивают подключение к сети CAN, но и решают задачи по управлению устройствами П и ПН. Основными контроллерами являются бортовой компьютер П и основной контроллер ПН.

Бортовой компьютер состоит из трех вычислительных устройств: собственно, бортовой компьютер (STM32), контроллер системы ориентации и стабилизации (STM32), процессорный модуль приложений (Raspberry Pi). В ReshUCube к Raspberry Pi подключена камера.

Контроллер ПН (STM32) в целом управляет всей ПН. С одной стороны, он является узлом CAN П, а с другой стороны – узлом CAN ПН. Каждый узел является отдельным видом ПН, в соответствии с концепцией реконфигурируемой космической лаборатории [4]. Кроме того, к контроллеру ПН подключена массовая память (Flash), являющаяся хранилищем накапливаемой телеметрии.

Запуск наноспутника ReshUCube состоялся 9.08.2022. Авионика продемонстрировала свою работоспособность в течение проводимых тестов бортового оборудования. Замечаний к настоящему времени не выявлено.



Архитектура бортовой авионики наноспутника ReshUCube-1

### Библиографические ссылки

1. Спутник. Приборы CubeSat [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat> (дата обращения: 05.09.2022).
2. CAN Protocol Tutorial [Электронный ресурс]. URL: <https://caxapa.ru/thumbs/728120/kvaser-can-protocol-tutorial.pdf> (дата обращения: 05.09.2022).
3. STM32 Tutorials [Электронный ресурс]. URL: <https://embedded-lab.com/blog/stm32-tutorials> (дата обращения: 05.09.2022).
4. Ханов В. Х., Зуев Д. М., Шахматов А. В. Реализации полезной нагрузки наноспутника ReshU-Cube как реконфигурируемой космической лаборатории. В материалах РЧ-21, т.1, с.418-419.

### References

1. *Pribory CubeSat* [Sputniks] (In Russ.) Available at: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat> (accessed: 05.09.2022).
2. *CAN Protocol Tutorial* (In Eng.) Available at: <https://caxapa.ru/thumbs/728120/kvaser-can-protocol-tutorial.pdf> (accessed: 05.09.2022).
3. *STM32 Tutorials* (In Eng.) Available at: <https://embedded-lab.com/blog/stm32-tutorials> (accessed: 05.09.2022).
4. Khanov V.KH., Zuev D. M., Shakhmatov A.V. *Realizatsii poleznoy nagruzki nanosputnika ReshU-Cube kak rekonfiguriruyemoy kosmicheskoy laboratorii*. [Proc. of "Reshetnev Readings"], 2021, vol. 1, pp. 418-419.

© Шахматов А. В., Ханов В. Х., 2022



**Секция**

**«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА  
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 621.382

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЯ ОДНОРОДНОСТИ 2-ГО РОДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ 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: itcnppom@atomlink.ru

*В докладе изложен подход к практическому использованию понятия однородности 2-го рода 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, однородность партии элементов.*

## USING OF THE CONCEPT OF THE SECOND TYPE HOMOGENEITY IN ELECTRONIC COMPONENT TESTING 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: itcnppom@atomlink.ru

*The report describes an approach to the practical use of the concept of homogeneity of the second type 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, homogeneity of the batch of elements.*

### Введение

В настоящих экономических условиях создание специализированного производства электронной компонентной базы (ЭКБ) космического применения в России представляется экономически нецелесообразным по причине его специфического мелкосерийного производства для космической отрасли, составляющей порядка 2 % от общего объема изделий ЭКБ, а также по причине высоких материальных и интеллектуальных затрат [1].

В связи с этим, в нашей стране комплектация аппаратуры космических аппаратов (КА) высоконадежными изделиями ЭКБ возможна только через испытательные технические центры (ИТЦ), выступающие связующим звеном между заводами изготовителями ЭКБ и их потребителями в космической отрасли.

ИТЦ формируют партии ЭКБ космического применения посредством проведения дополнительных испытаний (ДИ) электронных компонентов общего военного назначения с целью отбраковки элементов, содержащих дефекты, которые могут проявить себя при длительном функционировании в космическом пространстве [2].

Несмотря на успешную многолетнюю историю применения, методология ДИ требует постоянного совершенствования и внедрения новых перспективных научных разработок, в том числе, и в области прикладной математики [3].

**Математическое определение однородности 2-го рода**

Пусть задано множество P однотипных объектов:  $P = \{e_i (i=\overline{1, N_p})\}$ , качественные свойства которых определяется набором характеристик  $h_j (j=\overline{1, N_h})$ . Пусть также множество P обладает свойством *однородности 1-го рода*. Это означает, что его нельзя разбить на совокупность обособленных групп, удовлетворяющих заданным критериям качественного деления. Строгое определение однородности 1-го рода приведено в [4].

Будем считать, что множество P однотипных объектов (обладающее свойством однородности 1-го рода) будет обладать свойством однородности 2-го рода, если все элементы этого множества имеют близкие характеристики. Введем строгое определение этого понятия.

Пусть каждому элементу  $e_i \in P (i=\overline{1, N_p})$  соответствует вектор  $V_i^{hn} = (h_{i1}^n, h_{i2}^n, \dots, h_{iN_h}^n)$  нормированных характеристик  $h_j^n (j=\overline{1, N_h})$  [4].

Для множества P определяется виртуальный «центр множества»  $C_p^n = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} V_i^{hn}}{N_p}$ , которому соответствует вектор нормированных характеристик:  $V_p^{cn} = (h_1^{cn}, h_2^{cn}, \dots, h_{N_h}^{cn})$ , где:  $h_j^{cn} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} h_{ij}^n}{N_p} (j=\overline{1, N_h})$ .

Для каждого элемента  $e_i (i=\overline{1, N_p})$  множества P определяется *радиус элемента*  $R_i$  – расстояние до центра множества  $C_p^n$ :  $R_i = \|V_i^{hn} - C_p^n\|$ , где  $\|V\|$  - модуль вектора V. Если для расчетов расстояний между векторами применяется Евклидова метрика, то величина  $R_i (i=\overline{1, N_p})$  определяется формулой:

$$R_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_h} (h_{ij}^n - h_j^{cn})^2}$$

В работе [4] введено понятие *значимого отличия* между элементом и множеством: элемент  $e_i \in P (i=\overline{1, N_p})$  имеет значимое отличие от элементов множества P, если у элемента  $e_i$  существует характеристика  $h_j^n (j=\overline{1, N_h})$ , для которой выполняется неравенство:  $|h_{ij}^n - h_j^{cn}| \geq dz_j^n$ , где  $dz_j^n$  – заданный нормированный диапазон значимости характеристики. Элементы  $dz_j^n (j=\overline{1, N_h})$  образуют вектор нормированных диапазонов значимости  $V_{dz}^n = (dz_1^n, dz_2^n, \dots, dz_{N_h}^n)$ . Таким образом, каждому элементу  $e_i \in P (i=\overline{1, N_p})$  соответствует признак  $Pr_i^{sd}$  значимого отличия от элементов множества P:  $Pr_i^{sd} = 1$ , если значимое отличие есть и  $Pr_i^{sd} = 0$ , если значимого отличия нет.

Пусть задана некая функция  $F_{h2}$ , с помощью которой формируется граница однородности 2-го рода  $R_{h2}$ :  $R_{h2} = F_{h2}(P)$ .

Элемент  $e_i (i=\overline{1, N_p})$  для которого выполняется условие:  $\begin{cases} R_i \geq R_{h2} \\ Pr_i^{sd} = 1 \end{cases}$  будем называть *элементом-выбросом*.

Множество P однотипных объектов *обладает свойством однородности 2-го рода* в поле функции  $F_{h2}$ , если в его составе нет элементов-выбросов.

Функция  $F_{h2}$  называется *функцией определения однородности 2-го рода*.

**Алгоритмы определения однородности 2-го рода**

В данном разделе приведены два базовых алгоритма определения однородности 2-го рода.

*Алгоритм А.*

При данном подходе величина  $R_{h2}$  определяется по формуле:  $R_{h2} = R_{av} + k_R \cdot \sigma_R$ .

Здесь:  $R_{av}$  – среднее значение радиусов  $\{R_i (i=\overline{1, N_p})\}$ , определяемое соотношением  $R_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} R_i}{N_p}$ ,  $\sigma_R$  – среднеквадратическое (стандартное) отклонение радиусов  $R_i (i=\overline{1, N_p})$  от средней величины  $R_{av}$ ,

определяемое по формуле:  $\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (R_i - R_{av})^2}{N_p - 1}}$ ,  $k_R$  – коэффициент применения  $\sigma_R$  (как правило, на практике принимается:  $2 \leq k_R \leq 3$ ).

*Алгоритм Б.*

Алгоритм Б состоит из шести последовательных шагов, представленных ниже.

1) Из элементов множества  $P_p = \{R_i (i=\overline{1, N_p})\}$  формируется ранжированная по возрастанию последовательность  $R_p^r$  радиусов элементов  $e_i (i=\overline{1, N_p})$ :  $R_p^r = \{R_1^r, R_2^r, \dots, R_{N_p}^r\}$ , где элементы  $R_i^r (i=\overline{1, N_p})$  последовательности  $R_p^r$  (5.1.6) удовлетворяют условиям:  $\begin{cases} R_i^r \in R_p \\ R_i^r \leq R_{i+1}^r (i = \overline{1, N_p - 1}) \end{cases}$

При этом, для каждого элемента  $R_i^r$  ( $i=\overline{1, N_p}$ ) существует такой элемент  $R_{n_i}^r$  ( $n_i \in \{1, 2, \dots, N_p\}$ ), что выполняется условие:  $R_i^r = R_{n_i}^r$ . Или иначе, существует функция ранжирования  $f_r$ , ставящая в соответствие каждому номеру  $i$  ( $i=\overline{1, N_p}$ ) элемента последовательности  $R_p^r$  номер  $n_i \in \{1, 2, \dots, N_p\}$  элемента множества  $R_p$ :  $n_i = f_r(i)$ .

2) Формируется последовательность  $dR_p^r$ :  $dR_p^r = \{dR_1^r, dR_2^r, \dots, dR_{N_p-1}^r\}$ , где  $dR_i^r$  ( $i=\overline{1, N_p-1}$ ) определяется соотношением:  $dR_i^r = \frac{dR_i^r - dR_{i+1}^r}{dR_{i+1}^r}$ .

3) Рассчитывается  $dR_{h2}^c$ :  $dR_{h2}^c = dR_{av} + 3 \cdot \sigma_{dr}$ , где:  $dR_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p-1} dR_i^r}{N_p-1}$ ,  $\sigma_{dr} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p-1} (dR_i^r - dR_{av})^2}{N_p-2}}$ .

4) Рассчитывается  $dR_{h2}$ :  $dR_{h2} = \max(dR_{h2}^{\min}, dR_{h2}^c)$ , где:  $dR_{h2}^{\min}$  – минимальное (заданное) граничное значение величины  $dR_{h2}$  (на практике, как правило:  $dR_{h2}^{\min} \geq 0,10$ ).

5) На базе последовательности  $dR_p^r$  определяется номер  $k_{dr}$  как максимальный номер  $k$  ( $k=\overline{1, N_p-1}$ ), для которого выполняется условие:  $dR_k^r \geq dR_{h2}$ .

6) Определяется величина  $R_{h2}$ :  $R_{h2} = R_{n_{h2}}$ , где:  $R_{n_{h2}}$  – радиус элемента множества  $P = \{e_i(i=\overline{1, N_p})\}$  с номером  $n_{h2} = f_r(k_{dr})$ .

### Применение понятие однородности 2-го рода при проведении ДИ ЭКБ

Общая методология использования понятий однородности (1-го и 2-го рода) при проведении ДИ ЭКБ космического применения изложена в статьях [5,6].

Алгоритмы определения однородности 2-го рода и выявления элементов-выбросов используются при проведении ДИ для определения потенциально ненадежных (П/Н) элементов. В процессе ДИ определение П/Н элементов осуществляется по факту выхода значений тестовых параметров элементов (дрейфов тестовых параметров) за пределы заданных границ. По существующей методике такая проверка осуществляется по каждому тестовому параметру в отдельности. При этом не учитывает, так называемый, кумулятивный эффект. Предлагаемый подход позволяет осуществлять определение П/Н элементов комплексно, с учетом всей совокупности измеренных тестовых параметров.

В докладе приведен ряд практических примеров применения алгоритмов определения однородности 2-го рода и элементов-выбросов для выявления П/Н элементов. Приведен сравнительный анализ алгоритмов.

### Библиографические ссылки

1. Данилин Н.С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских космических телекоммуникаций. Учебно-методическое пособие. М.: РИО РТА, 2000. 76 с.
2. Программа дополнительных испытаний электрорадиоизделий в испытательных технических центрах для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА по заказам Генерального заказчика // Железногорск, 2008.
3. Орлов В.И., Федосов В.В. Качество электронной компонентной базы залог длительной работоспособности космических аппаратов//Решетневские чтения. 2013. Т. 1, №17. С. 238-241.
4. 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.
5. 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).
6. 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.]. M.: RIO RTA, 2000. 76s.
2. 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.).
3. 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.).
4. Golovanov, S. M. Ob opredelenii grupp odnorodnykh elementov metodami intellektualnoy obrabotki dannykh pri vysokotekhnologicheskome 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.
5. 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).
6. 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., 2022

УДК 621.373.121.13

## ТЕРМОСТАТИРОВАННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

А. О. Ложников

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»  
Российская Федерация, 644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231  
E-mail: trs@oniip.ru

*В докладе изложены особенности проектирования высоконадежных термостатированных кварцевых генераторов для применения в космических аппаратах.*

*Ключевые слова: термостатированный кварцевый генератор, резонатор-термостат, амортизатор, долговременная стабильность.*

## OVEN-CONTROLLED CRYSTAL OSCILLATORS FOR THE RESPONSIBLE APPLICATIONS

A. O. Lozhnikov

Omsk Scientific Research Institute of Instrument Engineering  
231, Maslennikova, Omsk, 644009, Russian Federation  
E-mail: trs@oniip.ru

*The report describes the design features of high-reliability OCXO for spacecrafts.*

*Keywords: OCXO, IHR crystal, snubber, aging.*

**Введение.** Стабильность и надежность источников опорных колебаний определяет качество и устойчивость радиосвязи, точность определения координат и скорости объектов в аппаратуре космических аппаратов. Изменение температуры окружающей среды, как правило, оказывает наибольшее влияние на стабильность частоты. Термостатированные кварцевые генераторы (ТСКГ) обеспечивают наилучшую температурную стабильность среди генераторов на основе пьезоэлектриков. При этом они обладают наименьшим уровнем фазовых шумов, что важно при умножении частоты до частот Ку и Ка диапазонов.

**Обоснование конструктивных решений генераторов.** В настоящее время наиболее перспективны генераторы на основе резонаторов-термостатов (РТ), в которых термостатируется только пьезоэлемент. Среди ТСКГ такие генераторы имеют наименьшее энергопотребление и меньшие габаритные размеры, что актуально для космической аппаратуры. Основой большинства ТСКГ на частоты до 30 МГц, являются кварцевые резонаторы двухповоротных среза SC. На частоты до 130 МГц наиболее часто применяют резонаторы ВТ среза. Резонаторы на основе кристаллических элементов (КЭ) данных срезов, по сравнению с резонаторами на основе ВТ среза, имеют основное преимущество – меньшее влияние климатических и механических воздействий на частоту, что объясняет их широкое применение. При этом у резонаторов двухповоротных срезов имеется один существенный недостаток – недостаточная моночастотность, связанная с более высокой добротностью и низким динамическим сопротивлением побочного колебания (мода В), по сравнению с основным колебанием (мода С). Так как значение частоты побочного колебания всего на ~10 % превышает частоту основного, схему автогенератора приходится усложнять, вводя в неё дополнительные селективные элементы, в основном резонансные цепи на основе катушек индуктивности [1].

Резонаторы для генераторов на частоты до 15 МГц как правило, работают на 3 гармонике, до 30 на 5-ой. Для решения проблем с побочным колебанием существуют схемы динамической селекции [2], но они очень требовательные к сопротивлениям побочных колебаний и стабильности параметров активных элементов схемы. При воздействии космического излучения активные элементы могут деградировать и в космической технике такие схемы не применимы. В настоящее время используются

дополнительные селективные элементы, в основном резонансные цепи на основе катушек индуктивности, а в перспективе для повышения надежности необходимо переходить на специализированные кварцевые резонаторы с улучшенной моночастотностью [1].

Введение селективных элементов затруднено на частотах выше 30 МГц, поэтому в высоконадежных генераторах применяются резонаторы VT среза [3].

Известно [3], что чем больше толщина кварцевого резонатора, тем меньше его старение, поэтому для обеспечения минимального старения используются гармониковые резонаторы. К примеру, для реализации генераторов на 80–130 МГц используются резонаторы по 5 механической гармонике на частоту 40–65 МГц. Выходная частота выше обеспечивается схемой удвоения.

Также применение гармониковых резонаторов позволяет уменьшить уровень фазовых шумов генераторов [4], что особенно актуально при умножении частоты до частот Ku и Ka диапазонов.

Обеспечение прочности и механическим воздействиям в специализированных генераторах обеспечивается применением амортизатора с собственной резонансной частотой в 2–3 раза ниже частот конструкции кварцевого резонатора-термостата [3].

**Заключение.** Использование проверенных конструктивных и схемотехнических решений позволяет создавать высоконадежные термостатированные кварцевые генераторы для космических применений [5].

### Библиографические ссылки

1. Ложников А. О. Улучшение температурной нестабильности кварцевых генераторов на основе резонаторов-термостатов SC-среза. XIX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems : preliminary program and abstracts, 20–24 June 2016. St. Petersburg. 2016. P. 103–10
2. Abramzon I., Baranushkin S., Gubarev A., Rotova O., Tapkov V. High-stability miniature OCXOs based on advanced IHR technology / 2007 IEEE International Frequency Control Symp., 2007. -p. 242-245.
3. Ложников А. О., Карагусов В. И., Розанова А. В. Термостатированный кварцевый генератор с диапазоном частот 80-130 МГц. Техника радиосвязи. 2019. Вып. 4 (43).
4. Ложников А. О., Лепетаев А. Н. Анализ фазовых шумов генераторов на основе расчета предельных уровней возбуждения кварцевых резонаторов различных срезов. Техника радиосвязи. 2020. Вып. 3 (46).
5. Ложников А. О. Перспективны образцы кварцевых и СВЧ-генераторов для ответственных применений. Наноиндустрия. 2021. Вып. S7(107).

### References

1. Lozhnikov A. Improving of temperature stability of OCXO based on IHR with SC-cut crystals. XIX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems : preliminary program and abstracts, 20–24 June 2016. St. Petersburg. 2016. P. 103–105
2. Abramzon I., Baranushkin S., Gubarev A., Rotova O., Tapkov V. High-stability miniature OCXOs based on advanced IHR technology / 2007 IEEE International Frequency Control Symp., 2007. -p. 242-245.
3. Lozhnikov A., Karagusov V., Rozanova A. The 80-130 Mhz oven-controlled crystal oscillator/ Radio communication technology. 2019. Vol. 4 (43).
4. Lozhnikov A., Lepetaev A., Analyses of oscillation phase noise basic on calculations of maximum excitation level different crystal cuts. Radio communication technology. 2020. Vol. 3 (46).
5. Lozhnikov A. Perspective samples of quartz and SHF-generators for the responsible applications. / Nanoindustry. 2021. Vol. S7 (107).

УДК 621.375.026

## МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ПО ТЕХНОЛОГИИ 0,25 мкм GaN HEMT\*

Д. А. Лужайцев, А. О. Туров, Д. С. Хохол, Ю. А. Миллер, Э. О. Лужайцева

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40  
E-mail: danil.wow67@gmail.com

*Данная статья посвящена результатам проектирования усилителя мощности по технологии 0,25 мкм GaN HEMT, который разрабатывается с целью использования в составе приёмопередающей микросхемы для использования в X-диапазоне частот. Статья отражает основные частотные зависимости, полученные в ходе моделирования электрической принципиальной схемы. Нитрид галлия в качестве материала позволяет решить проблему радиационной стойкости, которая важна при использовании МИС в космическом пространстве.*

*Ключевые слова: нитрид галлия, усилитель мощности, X-диапазон, САПР, надежность.*

## POWER AMPLIFIER MONOLITHIC MICROWAVE INTEGRATED CIRCUIT 0,25 $\mu\text{m}$ GaN HEMT

D. A. Luzhaitsev, A. O. Turov, D. S. Hohol, Y. A. Miller, E. O. Luzhaitseva

Tomsk state university of control system and radioelectronics  
40, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: danil.wow67@gmail.com

*This article is devoted to the design results of a power amplifier based on 0.25  $\mu\text{m}$  GaN HEMT technology, which is being developed to be used as part of a transmit-receive microcircuit for use in the X-band frequencies. The article shows the main frequency dependences obtained during the simulation of the electrical circuit diagram. Gallium nitride as a material makes it possible to solve the problem of radiation resistance, which is important when using MMIC in outer space.*

*Keywords: gallium nitride, power amplifier, X-band, CAD, reliability.*

**Введение.** Нитрид галлия в качестве материала монолитных интегральных схем (МИС) позволяет решить комплекс проблем современной микроэлектроники. Высокое напряжение пробоя позволяет работать при больших напряжениях, что соответственно увеличивает максимальную выходную мощность устройства [1]. Возможность получения эпитаксиальных структур, устойчивых к радиационной стойкости позволяет использовать микросхемы на основе нитрида галлия в экстремальных условиях, к которым в том числе относится космическое пространство [2].

**Подготовка к проектированию МИС.** Моделирование параметров монолитной интегральной схемы происходит на основе компактной модели, в основе которой лежали работы Ангелова, BSIM и Таджимы [3–5]. Модель описывает эффекты саморазогрева и эффект ловушек, который сказывается на параметрах выходного устройства. Оценка надежности монолитной интегральной схемы проводилась расчётным методом с использованием математических зависимостей температуры канала [6, 7].

**Результаты моделирования.** Моделирование МИС проводилось с использованием САПР электрическая принципиальная схема для моделирования приведена на рис. 1. Параметры усилителя мощности, полученные в ходе моделирования приведены на рис. 2.

Представленный на рис. 2 коэффициент усиления, полученный в ходе моделирования, в рабочем диапазоне частот от 8,5 до 10,5 имеет значение не менее 26 дБ. Возвратные потери составляют не ме-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда содействия инновациям» по договору № 48ГУРЭС14/72782 от 27.12.2021 в рамках проекта «Умник-21. Проектная команда. Электроника».

нее -9 дБ по входу и -15 дБ по выходу. Выходная мощность в насыщении ( $P_{SAT}$ ) усилителя мощности имеет значения не менее 43 дБм в рабочем диапазоне частот. Коэффициент полезного действия при этом в минимальной точке составляет 38 %.

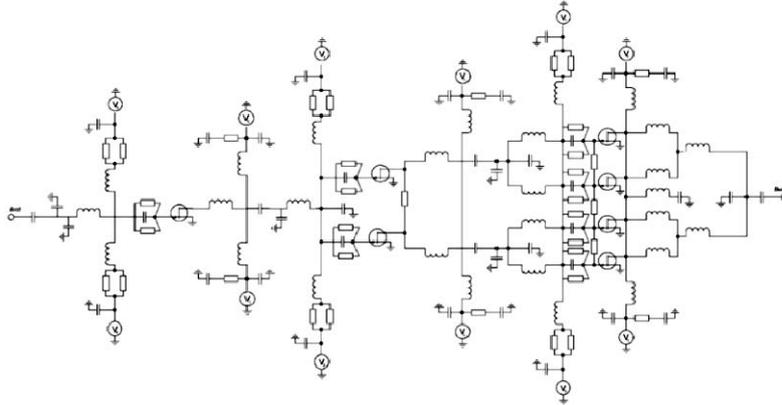


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема усилителя мощности

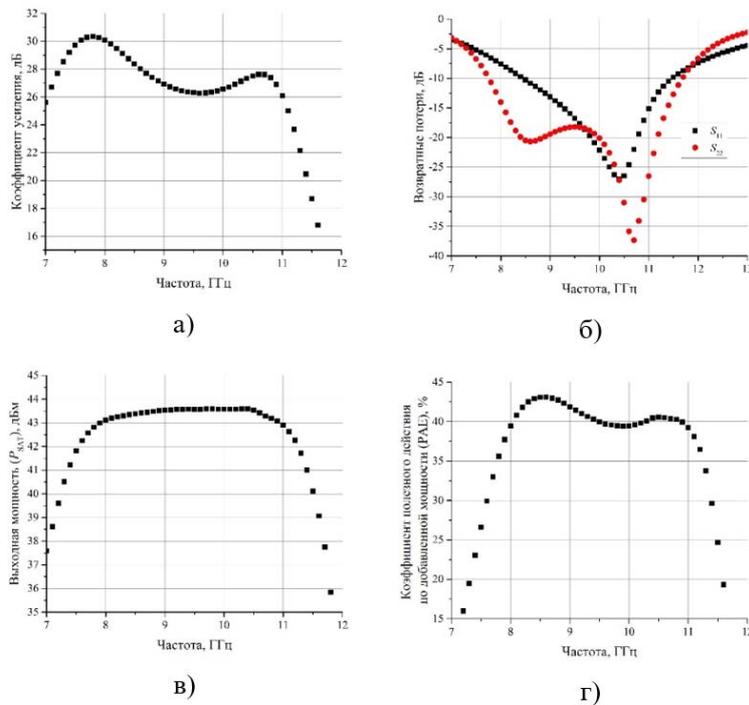


Рис. 2. Частотная зависимость:

а – коэффициента усиления; б – возвратных потерь; в – выходная мощность ( $P_{SAT}$ ); г – коэффициента полезного действия по добавленной мощности (PAE)

Модель транзистора не предполагает работу при изменении температуры окружающей среды. При нормальных условиях – температура 25 °С, используя математический аппарат для расчёта температуры канала и частотную зависимость тока в режиме насыщения, были получены следующие зависимости относительного изменения температуры и температуры канала транзистора в нелинейном режиме работы, приведённые на рис. 3.

Разница значений на рис. 3, а температуры канала, обусловленная разными математическими аппаратами моделей расчета, составляет около 15 °С или около 10%. Максимальное значение составляет 155 °С. Температура нагрева относительно внешней температуры составляет не более 130 °С. При нормальной температуре окружающей среды среднее время наработки на отказ составляет  $4 \cdot 10^7$  часов.

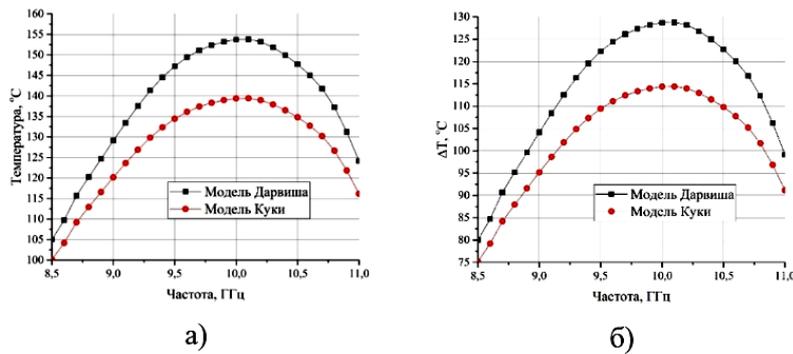


Рис. 3. Частотная зависимость:

*a* – температуры канала; *б* – относительного изменения температуры при нормальных условиях

**Заключение.** Усилитель мощности на основе нитрида галлия позволяет добиться высокого значения выходной мощности более 43 дБм или 20 Вт и позволяет получить высокую оценочную надежность при нормальных условиях.

### Библиографические ссылки

1. Pengelly R. S. A review of GaN on SiC High electron-mobility power transistors and MMICs // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 60. no.6. June 2012. pp. 1764-1783
2. Монолитные интегральные схемы на основе нитрида галлия для радиолокации ближнего действия и средств связи в диапазоне частот 22-25 ГГц / Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Бугаев А. С. и др. // «Микроэлектроника», 2022, Т. 51, № 3, стр. 195-201.
3. Angelov I. "Extensions of the Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET Model / Bengtsson, L., Garcia, M. // IEEE MTT Vol. 44, No. 10, October 1996.
4. Cheng Y. MOSFET modeling & BSIM3 user's guide // Kluwer Academic Publishers, 1999, 461p.
5. Tajima Y. GaAs FET Large-Signal Model and its Application to Circuit Designs // IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-28, pp.171-175, Feb.1981.
6. Лужайцев Д. А., Туров А. О. Расчёт температуры канала HEMT транзистора в составе GaN МИС // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2021» 19-21 мая 2021. Томск: из-во Спектр с. 48–50
7. Evaluation of the Reliability of a X-band Low-Noise Amplifier at Different Ambient Temperatures / Luzhaitsev D. A., Turov A. O., Miller Y. A. // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2022, pp. 118-123.

### References

1. Pengelly R. S. A review of GaN on SiC High electron-mobility power transistors and MMICs // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 60. no.6. June 2012. p. 1764-1783
2. Monolitnye integral'nye shemy na osnove nitrida gallija dlja radiolokacii blizhnego dejstvija i sredstv svjazi v diapazone chastot 22-25 GGc / Matveenko O. S., Gnatjuk D. L., Bugaev A. S. etc. // « Mikrojelektronika », 2022, Т. 51, № 3, p. 195-201.
3. Angelov I. "Extensions of the Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET Model / Bengtsson, L., Garcia, M. // IEEE MTT Vol. 44, No. 10, October 1996.
4. Cheng Y. MOSFET modeling & BSIM3 user's guide // Kluwer Academic Publishers, 1999, 461p.
5. Tajima Y. GaAs FET Large-Signal Model and its Application to Circuit Designs // IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-28, p.171-175, Feb.1981.
6. Luzhajcev D. A., Turov A. O. Raschjot temperatury kanala HEMT tranzistora v sostave GaN MIS // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh «Nauchnaja sessija TUSUR 2021» 19-21 maja 2021. Tomsk: Spektr publ p. 48–50
7. Evaluation of the Reliability of a X-band Low-Noise Amplifier at Different Ambient Temperatures / Luzhaitsev D. A., Turov A. O., Miller Y. A. // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2022, p. 118-123.

УДК 621.3

## РЕКУПЕРАТОРЫ ЭНЕРГИИ ИОНОВ ПЛАЗМЫ

Л. Н. Никитина, В. И. Трифанов, А. В. Бельман, 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

*Рассмотрены рекуператоры ионов плазмы, а также предложен рекуператор энергии положительных и отрицательных ионов потоков плазмы.*

*Ключевые слова: ионы плазмы, рекуператор, суперконденсатор.*

## PLASMA ION ENERGY RECUPERATORS

L. N. Nikitina, V. I. Trifanov, A. V. Belman, 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

*Plasma ion recuperators are considered, and a recuperator for the energy of positive and negative ions of plasma flows is proposed.*

*Keywords: plasma ions, recuperator, supercapacitor.*

В потоке плазмы часто встречаются положительно и отрицательно заряженные ионы, а также электроны, энергию которых требуется рекуперировать одновременно и накапливать энергетическую мощность, а заряд нейтрализовать. Актуальной проблемой также может быть возможность рекуперации энергии заряженных частиц от солнечного ветра, которые могут представлять опасность для космических аппаратов.

Существуют рекуператоры ионов плазмы, включающие систему торможения и рекуперации [1]. Недостатком их являются большие габаритно-массовые характеристики и невозможность накапливать электростатическое электричество. Предложен рекуператор энергии положительно заряженных ионов [2], позволяющий накапливать электростатическую энергию, состоящий из торцевого суперконденсатора с положительно и отрицательно заряженными электродами, по оси которого установлен изолированный управляющий электроотражатель, а также боковых суперконденсаторов тока с многоколлекторными положительно и отрицательно заряженными электродами.

Рекуператор энергии может рекуперировать положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные ионы только после перезарядки и переключения полярности на электродах, что снижает его технические возможности.

Рекуператоры энергии ионов могут быть выполнены в виде единого энергетического блока [3] из рекуператоров энергии положительно и отрицательно заряженных ионов, расположенных в шахматном порядке для создания эффективной системы рекуперации совмещенной, например, с системой радиационной защиты объектов от воздействия на них заряженных частиц плазмы.

При создании радиационной защиты энергетический блок рекуператоров может устанавливаться у полюсов магнитного поля, удерживающего заряженные частицы и повышающего концентрацию их заряда, а затем направлять их в зону магнитной фокусировки, а затем через отсечные электроды для декомпозиции потока по знаку заряда в полость рекуператоров положительно и отрицательно заряженных частиц.

Для рекуперации ионов плазмы предложен энергетический блок [3] из нескольких рекуператоров, созданный на основе рекуператора энергии положительно заряженных ионов, путем электрического соединения при помощи отрицательно заряженных электродов боковых суперконденсаторов с отри-

цательно заряженными многоколлекторными электродами идентичных с ним по построению рекуператоров энергии отрицательно заряженных частиц. Положительно и отрицательно заряженные электроды торцевого суперконденсатора этого же рекуператора должны быть электрически соединены соответственно с положительно и отрицательно заряженными электродами торцевых суперконденсаторов рекуператоров энергии отрицательно заряженных частиц.

Соединение нескольких одинаковых по строению рекуператоров энергии холодной плазмы позволяет обеспечить рекуперацию энергии положительно и отрицательно заряженных ионов и одновременно преобразовать ее в электростатическое электричество, а также нейтрализовать заряд с повышением КПД и разрядной мощности суперконденсаторов.

#### Библиографические ссылки

1. Димитров С. К., Обухов В. А. Системы торможения и рекуперации энергии плазменных потоков, (Ионные инжекторы и плазменные ускорители) / под ред. А. И. Морозова и Н. Н. Семашко. М. : Энергоатомиздат, 1989. С. 193–219.
2. Пат. 2617689 Российская Федерация, МПК H04B 13/00. Рекуператор энергии положительно заряженных ионов / Трифанов И. В., Казьмин Б. Н., Трифанов В. И., Оборина Л. И. № 2016115104; заявл. 19.04.2016; опубл. 26.04.2017, Бюл. № 12. 15 с.
3. Пат. 2719503 Российская Федерация, МПК H05H 7/00. Рекуператор энергии ионов плазмы / Трифанов И. В. № 2019125761; заявл. 13.08.2019; опубл. 20.04.2020, Бюл. № 11. 10 с.

#### References

1. Dimitrov S. K., Obukhov V. A. *Sistemy` tormozheniya i rekuperaczii e`nergii plazmenny`kh potokov, (Ionny`e inzhektory` i plazmenny`e uskoriteli)* [Systems for braking and restoring the energy of plasma flows, (Ion injections and plasma accelerators)]. Moscow, E`nergoatomizdatPubl., 1989, 193-219 p.
2. Trifanov I. V., Kazmin B. N., Trifanov V. I., Oborina L.I. *Rekuperator e`nergii polozhitel`no zaryazhenny`kh ionov* [Positive ion energy recuperator]. Patent RF, no. 2617689, 2017.
3. Trifanov I. V. *Rekuperator e`nergii ionov plazmy`* [Plasma ion energy recuperator]. Patent RF, no. 2719503, 2019.

© Трифанов В. И., Бельман А. В., Трифанов И. В., 2022

УДК 62:546.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В КЕРАМИКЕ $Al_2O_3+MgO$ , ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ SPS

Ф. М. Носков<sup>1</sup>, Л. И. Квеглис<sup>1,2</sup>, А. И. Ештокина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10

<sup>2</sup> Восточно-Казахстанский Университет им. С. Аманжолова  
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 55

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Российская Федерация, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

E-mail: fnoskov@sfu-kras.ru

*Исследованы образцы керамики на основе порошков оксида алюминия и магния, полученных методом электроискрового спекания при различных температурно-временных режимах, как потенциальные материалы для подложек печатных плат аппаратуры космического назначения. Показано, что с повышением температуры активизируется проникновение углерода из графитовых пуансонов и матрицы в получаемую керамику, формируя ферромагнитную фазу  $Al_4C_3$ , упорядоченно ориентированную по сечению образца.*

*Ключевые слова: керамика, спекание, оксид алюминия, шпинель, карбид алюминия.*

## INVESTIGATION OF PHASE FORMATION PROCESSES IN $Al_2O_3+MgO$ CERAMICS OBTAINED BY THE SPS METHOD

F. M. Noskov<sup>1</sup>, L. I. Kveglis<sup>1,2</sup>, A. I. Yeshtokina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University  
79/10, Free av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup> S. Amanzholov East Kazakhstan University  
55, Kazakhstan str. Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>3</sup> National Research Nuclear University "MEPhI"  
31, Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russian Federation

E-mail: fnoskov@sfu-kras.ru

*Ceramic samples based on aluminum oxide and magnesium oxide powders obtained by electric spark sintering under various temperature and time conditions as potential materials for the substrates of printed circuit boards of space equipment are studied. It is shown that with an increase in temperature, the penetration of carbon from graphite punches and the matrix into the resulting ceramics is activated, forming a ferromagnetic phase  $Al_4C_3$ , ordered oriented along the cross section of the sample.*

*Keywords: ceramics, sintering, aluminum oxide, spinel, aluminum carbide.*

**Введение.** Развитие космонавтики неразрывно связано с развитием электронной компонентной базы космических систем. В последнее время для производства печатных плат все большее распространение получают керамические подложки. Применение новых технологических процессов при их производстве позволяет менять механические характеристики, структуру, проводимость и другие свойства [1]. Целью настоящей работы было исследование процессов структурообразования в образцах керамики полученной методом электроискрового спекания (SPS – Spark Plasma Sintering) из порошков оксида алюминия и магния [2].

**Экспериментальные методы.** Спекание порошков проводилось на установке Labox Sinter Land ИГиЛ СО РАН методом SPS, когда импульсы электрического тока проходят через предварительно

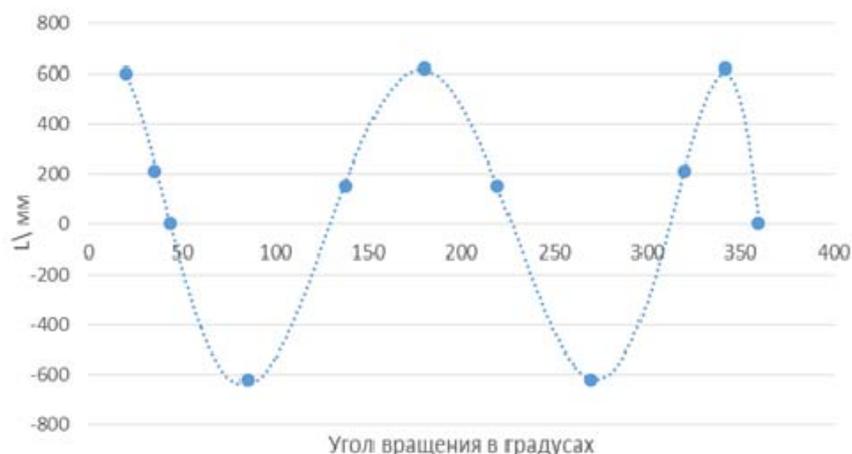
спрессованный порошок<sup>1</sup>. В ходе эксперимента использовали нанодисперсные порошки оксидов магния и алюминия сжимаемые графитовыми пуансонами в графитовой матрице [3]. Между графитовыми пуансонами пропускали ток и создавали давление до 40 МПа. Прессование проводилось в основном при максимальной температуре равной 1400 °С (в дополнительных экспериментах при 1200 и 1600 °С) и давлении 40 МПа. Скорость нагрева была 100 °С/мин, выдержки при максимальной температуре не было. Диаметр полученных образцов 10 мм, а толщина 2,6–3,0 мм. Плотность керамики 3,7–3,95 г/см<sup>3</sup>. Образцы исследованы методом рентгеноструктурного анализа, магнитометрии, а также выполнены снимки микроструктур на оптическом микроскопе.

**Результаты экспериментов.** Исследование образцов в оптическом микроскопе показали существенное различие в строении образцов полученных по разным режимам. Результаты расшифровки кратины дифракции рентгеновских лучей приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что в процессе спекания порошковой заготовки в ней происходили существенные структурные изменения. По мере роста температуры спекания оксид магния полностью исчез, но сформировались фазы алюмомагниевого шпинели ( $MgAl_2O_3$ ), а так же фазы минерала магнезита ( $MgCO_3$ ). Кроме того выявлены рефлексы, отвечающие фазам оксикарида ( $Al_2O_3C$ ) и карбида алюминия ( $Al_4C_3$ ). Из всех выявленных фаз, существенными ферромагнитными свойствами обладает только последняя.

#### Результаты рентгенофазового анализа

Температура спекания образца, °С	Фазовый состав
1200	$\alpha-Al_2O_3$ , $\gamma-Al_2O_3$ , $MgAl_2O_3$ , $MgO$ , $MgCO_3$
1400	$\alpha-Al_2O_3$ , $\gamma-Al_2O_3$ , $MgAl_2O_3$ , $Al_2O_3C$ , $MgCO_3$
1600	$\alpha-Al_2O_3$ , $\gamma-Al_2O_3$ , $MgAl_2O_3$ , $Al_4C_3$ , $MgCO_3$

Проводились исследования крутящего магнитного момента полученных образцов в торсионном магнитометре [4, 5]. На рисунке приведена кривая крутящего момента полученная с образца, спеченного при температуре 1600 °С, содержащего фазу  $Al_4C_3$ . Из кривой крутящего магнитного момента видно, что формирование одноосной анизотропии на каждом участке образца спеченной керамики происходит в условиях жесткой конкуренции двух механизмов: механизма, связанного с приложением механической нагрузки (1ГПа) в процессе спекания, и ориентационного, обусловленного внешним постоянным магнитным полем (10кЭ), приложенным в процессе измерения. Это достаточно необычная магнитная структура, так как стандартные кривые крутящих моментов характеризуются симметричной синусоидой в случае однородного намагничивания. Указанная особенность, говорит о структурной самоорганизации произошедшей в процессе спекания образца и об ориентированном росте карбида алюминия относительно алюмомагниевого шпинели. Подобные примеры самоорганизации двух фаз, одна из которых алюмомагниевого шпинель представлены в работе [6].



Кривая крутящих магнитных моментов полученная от спеченного порошка, содержащего фазу  $Al_4C_3$

<sup>1</sup> Выражаем благодарность Мали В. И. за предоставленные образцы.

**Заключение.** Проведено исследование процесса фазообразования при спекании методом SPS порошка  $Al_2O_3+MgO$ , сжимаемого графитовыми пуансонами в графитовой матрице.

Показано, что при спекании происходит перенос углерода с пуансонов и матрицы в порошок  $Al_2O_3+MgO$  и твердофазная реакция, в результате которой формируются соединения: шпинель –  $MgAl_2O_4$ , карбонат магния –  $MgCO_3$  и оксикарбид алюминия –  $Al_2OC$  и карбид алюминия  $Al_4C_3$ . Процесс фазового перехода осуществляется путем превращения оксида алюминия  $Al_2O_3$  в промежуточную фазу  $Al_2OC$ , а затем при повышении температуры в карбид алюминия  $Al_4C_3$ , при этом избыточный кислород входит в состав магнезита  $MgCO_3$ , возникающего на основе оксида магния  $MgO$ .

Исследование магнитных свойств образца (1600 °С) методом крутящих магнитных моментов показало, что образец магнитно-неоднороден и обладает двумя осями намагничивания, что свидетельствует об возникновении в его структуре магнитной фазы  $Al_4C_3$ , упорядоченно ориентированной по его сечению.

### Библиографические ссылки

1. Superplasticity of Zirconia Alumina Spinel Nanoceramic Composite by Spark Plasma Sintering of Plasma Sprayed Powders / Zhou Xinzhang, Hulbert Dustin M., Kuntz Joshua D. et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. 2005. V. 39. P. 353–359.
2. Анциферов В.Н., Перельман В.Е. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: 2001. 202 С.
3. Nanostructures: Physics and Technology // *Proceedings of 16th International Symposium (June 25–29, 2007)*. St. Peterburg: Ioffe Institute, 2007. 370 p.
4. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М. : Мир, 1987. 420 с.
5. Методы получения магнитных слоев и исследования их физических / В. С. Жигалов, С. Н. Варнаков, К. П. Полякова, В.А. Середкин, Г.П. Фролов. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2008. 164 с.
6. Кристаллогеометрический механизм срастания шпинели и сульфида марганца в комплексное неметаллическое включение / В. С. Крапошин, А. Л. Талис, Е. Д. Демина, А. И. Зайцев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 7. С. 4–12.

### References

1. Superplasticity of Zirconia Alumina Spinel Nanoceramic Composite by Spark Plasma Sintering of Plasma Sprayed Powders / Zhou Xinzhang, Hulbert Dustin M., Kuntz Joshua D. et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. 2005. V. 39. P. 353-359.
2. Antsiferov V.N., Perelman V.E. *Mechanics of pressing processes of powder and composite materials*. Moscow: 2001. 202 p.
3. Nanostructures: Physics and Technology // *Proceedings of 16th International Symposium (June 25–29, 2007)*. St. Peterburg: Ioffe Institute, 2007. 370 p.
4. Thikadzumi, S. *Physics of ferromagnetism. Magnetic characteristics and practical applications*. Moscow: Mir, 1987. 420 p.
5. Methods for obtaining magnetic layers and studying their physical properties / V. S. Zhigalov, S. N. Varnakov, K. P. Polyakova, V.A. Seredkin, G.P. Frolov. Krasnoyarsk : *Sib. gos. Aerospace. un-t*, 2008. 164 p.
6. The crystallogometric mechanism of the fusion of spinel and manganese sulfide into a complex non-metallic inclusion / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, E. D. Demina, A. I. Zaitsev // *Metal Science and Heat Treatment*. 2015. No. 7. pp. 4-12.

© Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Ештокина А. И., 2022

УДК 621.38

## ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В ПОЛИМЕРНЫХ КОРПУСАХ

Ю. Н. Савельев

ФГБУ «46 центральный научно-исследовательский институт»  
Министерства обороны Российской Федерации  
Российская Федерация, 129327, г. Москва, пр-д Чукотский, д. 10  
E-mail: savelyevyn@yandex.ru

*В статье приведены основные требования, предъявляемые к полимерным материалам, описываются методы герметизации приборов, в том числе с использованием корпусов с открытой полостью, излагаются требования к характеристикам перспективных полимерных материалов.*

*Ключевые слова: полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы, полимерно-композитные материалы, корпусирование, герметизация, внешние воздействующие факторы, радиоэлектронная аппаратура, электронная компонентная база, планирование, разработка, повышение эффективности.*

## FEATURES OF THE PRODUCTION OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND INTEGRATED CIRCUITS IN POLYMER CASES

Yu. N. Savel'ev

Federal State Budgetary Institution  
«46 Central Research Institute» of the Ministry of Defense of Russia,  
10, Chukotsky Av., Moscow, 129327, Russian Federation  
E-mail: savelyevyn@yandex.ru

*The article presents the basic requirements for polymer materials, describes the methods of sealing devices, including using open-cavity housings, sets out the requirements for the characteristics of promising polymer materials.*

*Keywords: semiconductors, integrated circuits, polymer-composite materials, packaging, sealing, external influencing factors, radio-electronic equipment, electronic component base, planning, development, improving efficiency.*

В настоящее время в производстве ЭРИ, в частности, полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных микросхем (ИМС) широко применяются полимерные и полимерно-композитные материалы (далее – ПКМ). Применение ПКМ является перспективным направлением в корпусировании ПП и ИМС [1].

За рубежом накоплен очень большой опыт производства и широкого применения ПКМ. Приборы в пластмассовых корпусах уже широко применяются в аэрокосмической отрасли (NASA) [1].

Отечественные полимерные материалы по своим характеристикам существенно уступают зарубежным, и поэтому отечественные ПП и ИМС в пластмассовых корпусах практически не используются в аппаратуре, тем более в бортовой аппаратуре космических аппаратов.

Ограничения по применению декларированы Перечнем ЭКБ 02 – «Микросхемы интегральные»<sup>1</sup> и в Перечнем ЭКБ 03 – «Приборы и модули полупроводниковые»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. Часть 2 Микросхемы интегральные. Книга 1. Минпромторг, 2021.

Вкратце рассмотрим основные проблемные вопросы, которые приходится решать разработчикам и изготовителям ПП и ИМС, применяющих полимерные материалы.

В производстве используют полимерные материалы на основе эпоксидных, кремнийорганических и полиэфирных смол, которые должны [2]:

- быть механически прочными, сохранять стабильность своих параметров и характеристик в диапазоне температур от минус 60 до плюс 150 °С;
- обладать высокими диэлектрическими;
- быть химически стойкими;
- не содержать примесей, негативно влияющих на функциональные и эксплуатационные параметры приборов.

Стабильность и надежность работы приборов определяются процессами, которые происходят на поверхности кристаллов из-за наличия на них влаги, оставшейся с этапа производства, а также проникающей через полимерную оболочку корпуса при эксплуатации.

Очистка поверхности пластин и её защита от внешних воздействующих факторов являются сложными технологическими операциями. Различают загрязненную, чистую и атомарно чистую поверхности [2]. Чистой считается поверхность, на которой имеются отдельные загрязненные участки, а атомарно-чистой – на которой отсутствуют какие-либо посторонние вещества.

Поверхностные загрязнения разделяются на молекулярные, ионные и атомарные. Молекулярные загрязнения закрепляются на поверхности пластины статически. К ионным загрязнениям относятся растворимые в воде соли, кислоты и основания, которые осаждаются на поверхности пластин из травильных и моющих растворов.

Герметизацию (капсуляцию, опрессовку) выполняют несколькими методами, основными из которых являются заливка исходной конструкции прибора в съемные формы и корпуса, обволакивание конструкции или ее окунание, литьевое (трансферное) и компрессионное прессование [2].

Перспективными являются пластмассовые корпуса с открытой полостью (open cavity package). Интерес к ним значительно вырос после того, как был промышленно освоен термопластичный жидкокристаллический полимер (ЖКП) [3]. По зарубежной классификации – LCP (Liquid Crystal Polymer). Особенностью ЖКП является очень низкое поглощение паров воды. По стойкости к парам воды ЖКП идентичен обычному стеклу.

Корпуса с применением ЖКП не только являются более герметичными в сравнении с традиционными монолитными пластмассовыми корпусами, но в них отсутствуют риски десорбции паров воды при последующих обработках и термических операциях, то есть отсутствует угроза отказов, связанных с данным фактором.

По механическим свойствам ЖКП – это прочный, жесткий, но не ломкий термопласт, не содержащий галогенов, невоспламеняющийся и стойкий к растворителям и агрессивным веществам, легко подвергается вторичной переработке.

Компания Interplex QLP совместно с Freescale Semiconductor разработала усовершенствованный ЖКП марки Quantech, отличающийся, в сравнении с традиционными ЖКП [3], более высокой положительной рабочей температурой, до 400 °С. ЖКП марки Quantech обладает значительной устойчивостью к деформациям и механическим воздействиям.

Высокие параметры имеют также ЖКП марки НТР1280 компании RJR Technologies [3]. В зависимости от области применения наибольшее распространение получили их корпуса четырех типов:

- безвыводные QFN-корпуса для интегральных микросхем и MEMS;
- корпуса QFP с четырехсторонними формованными выводами под поверхностный монтаж для интегральных микросхем и датчиков;
- корпуса SOIC, SSOP с двухсторонними формованными выводами под поверхностный монтаж для интегральных микросхем и датчиков;
- корпуса для мощных СВЧ-приборов (транзисторов, RFIC, усилителей мощности и др.).

У пластмассовых корпусов с открытой полостью есть еще одно преимущество перед керамическими и монолитными пластмассовыми корпусами – ремонтпригодность. Компания RJR

---

<sup>2</sup> Перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. Часть 3 Приборы и модули полупроводниковые. Книга 1. Минпромторг, 2021.

Technologies выпускает двухкомпонентный эпоксидный клей, предназначенный для устранения утечек.

Пластмассовые корпуса с открытой полостью способны обеспечивать уровень влагостойкости MSL3 по J-STD-020 и полное соответствие требованиям тестов на грубую утечку, что подтверждает возможность их применения в различной, в том числе военной аппаратуре.

Совершенствование имеющихся и создание новых полимерных материалов с высокой адгезией к металлическим выводным рамкам, повышение их термостабильности до 400 °С и более, увеличение влагостойкости до уровня MSL1 – таковы планы по дальнейшему совершенствованию производства ПП и ИМС с применением полимерных материалов.

По мере реализации перечисленных планов ЭРИ в пластмассовых корпусах будут все активнее внедряться в малогабаритную бортовую радио электронную аппаратуру, а также в аппаратуру космических станций с длительным сроком активного функционирования.

#### Библиографические ссылки

1. Аносов В. В. Разработка полимерных композиционных материалов для герметизации микросхем и полупроводниковых приборов в малогабаритной бортовой аппаратуре космических аппаратов // anosov-v.-v.pdf.
2. Воробьев Д. Г. Герметизация полупроводниковых приборов и МС // <http://www.allbest.ru>.
3. Боднар Д., Пластмассовые корпуса с открытой полостью для интегральной и СВЧ-электроники, // Компоненты и технологии, № 11, 2016. [ww.kit-e.ru](http://www.kit-e.ru).

#### References

1. Anosov V. V. Razrabotka polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya germetizatsii mikroskhem i poluprovodnikovyykh priborov v malogabaritnoy bortovoy apparature kosmicheskikh apparatov // anosov-v.-v.pdf.
2. Vorob'ev D. G. Germetizatsiya poluprovodnikovyykh priborov i MS // <http://www.allbest.ru>.
3. Bodnar' D., Plastmassovyye korpusa s otkrytoy polost'yu dlya integral'noy i SVCh-elektroniki, // Komponenty i tekhnologii, № 11, 2016. [ww.kit-e.ru](http://www.kit-e.ru).

© Савельев Ю. Н., 2022

УДК 621.787

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

В. И. Трифанов\*, Е. К. Новосельская, 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

*Рассмотрены методы дистанционной передачи и преобразования СВЧ – энергии в постоянный электрический ток.*

*Ключевые слова: СВЧ-энергия, преобразователь, поглотитель, усилитель.*

## CONVERSION OF MICROWAVE ENERGY INTO DIRECT ELECTRIC CURRENT

V. I. Trifonov\*, E. K. Novoselskaya, 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

*Methods of remote transmission and conversion of microwave energy into direct electric current are considered.*

*Keywords: Microwave energy, converter, absorber, amplifier.*

Актуальным является дистанционная передача и преобразование СВЧ-энергии в электрическую энергию постоянного тока, предназначенную для энергообеспечения аэрокосмических летательных аппаратов, летательных электродинамических аппаратов и других объектов [1, 2].

Преобразователь СВЧ-энергии в постоянный электрический ток может быть выполнен многослойным: содержать поглотитель с усилителем энергии электронов и собственно преобразователь, который может представлять полупроводниковую матрицу [3, 4] с предельной рабочей температурой 600–700 °С [5].

Поглотитель с усилителем могут быть выполнены в виде композиционного покрытия, содержащего графеновую пленку и модифицированные углеродные нанотрубки на металлической основе. Разновидностью преобразователя СВЧ-энергии и энергии пучков электронов в электрический ток может быть преобразователь [6], содержащий многослойные многоколлекторные электроды, внешние слои которых выполнены путем сочетания графена и углеродных нанотрубок и электрически соединенные с суперконденсаторами, на которых может накапливаться электростатический заряд, преобразуемый в постоянный электрический ток. Предельный температурный режим таких преобразователей может быть до 200°С.

Установлено, что самая высокая эффективность около 90 % достигнута на частоте 2,45 ГГц при беспроводной передаче энергии микроволновым излучателем. Передача СВЧ энергии может так же осуществляться на частотах 5,8 ГГц, 8,5 ГГц, 10 ГГц и 35 ГГц.

Технологические разработки в области передачи энергии микроволновым излучением могут иметь преимущества, если для передачи мощности будут созданы соответствующие разработки, с незначительными потерями и безопасные [2].

### Библиографические ссылки

1. Ларионов Д. В. Беспроводная передача энергии // Молодой ученый. 2018. № 44 (230). С. 39-41.
2. Radioradar [Электронный ресурс]. URL: [http://www.radioradar.net/articles/scientific\\_technical/svch.html](http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/svch.html) (дата обращения: 2.09.2022).

3. Пат. 2335061 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H 02 J 17/00. Система энергообеспечения летательных электродинамических аппаратов / Ключев В. В., Запускалов В. Г. № 2007107896/11; заявл. 05.03.2007; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. 6 с.
4. Пат. 2117398 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H 04B 13/00. Способ передачи энергии в вакууме / Аликаев В. В., Егоров А. Н., Латышев Л. А., Семашко Н. Н. № 97103964/09; заявл. 13.03.1997; опубл. 10.08.1998, 6 с.
5. Пат. 2746355 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H 04B 13/00. Система энергообеспечения аэрокосмических летательных электродинамических аппаратов / Трифанов И. В., Мелкозеров М. Г., Трифанов В. И. № 2020130533; заявл. 15.09.2020; опубл. 12.04.2021, Бюл. № 11, 14 с.
6. Пат. 2625325 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H 05H 7/00. Рекуператоры энергии пучка заряженных частиц / Трифанов И. В., Трифанов В. И., Оборина Л. И. № 2015151851; заявл. 02.12.2015; опубл. 07.06.2017, Бюл. № 16, 13 с.

### References

1. Larionov D.V., *Besprovodnaya peredacha e`nergii* [Wireless power transmission]. Young scientist. 2018, no. 44, p. 39-41 (In Russ.).
2. Radioradar : [http://www.radioradar.net/articles/scientific\\_technical/svch.html](http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/svch.html) (accessed 02.09.2022).
3. Klyuev V.V., Zapuskalov V.G. *Sistema e`nergoobespecheniya letatel`ny`kh e`lektrodinamicheskikh apparatov* [Power supply system for aircraft electrodynamic vehicles]. Patent RF, no. 2335061, 2008.
4. Alikaev V.V., Egorov A.N., Latyshev L.A., Semashko N.N. *Sposob peredachi e`nergii v vakuume* [The method of transferring energy in a vacuum]. Patent RF, no. 2117398, 1998.
5. Trifanov I.V., Melkozerov M.G., Trifanov V.I. *Sistema e`nergoobespecheniya ae`rokosmicheskikh letatel`ny`kh e`lektrodinamicheskikh apparatov* [Power supply system for aerospace flying electrodynamic vehicles]. Patent RF, no. 2746355, 2020.
6. Trifanov I. V., Trifanov V. I., Oborina L. I. *Rekuperatory` e`nergii puchka zaryazhenny`kh chasticz* [Charged particle beam energy recuperators]. Patent RF, no. 2625325, 2017.

© Трифанов В. И., Новосельская Е. К., Трифанов И. В., 2022

УДК 620.1:629.68

**ПАРАМЕТРЫ ОДИНОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ, СОЗДАВАЕМЫХ  
ПОТОКОМ НЕЙТРОНОВ ОТ РАДИОИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
НА БОРТУ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КА**

Н. М. Хамидуллина\*, И. В. Зефилов, П. С. Черников

Акционерное общество «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»  
Российская Федерация, 141400, г. Химки, Московская область, улица Ленинградская, 14а  
E-mail: \*KHamidullinaNM@laspace.ru

*Доклад содержит результаты расчёта частоты и числа (вероятности) случайных одиночных эффектов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), вызываемых потоком нейтронов от бортовых радиоизотопных источников тепла (РИТ) на основе диоксида плутония-238 в период межпланетного полёта космического аппарата с посадкой на Марс.*

*Ключевые слова: одиночные эффекты – сбои и отказы; интегральные микросхемы; радиоэлектронная аппаратура; радиоизотопные источники; нейтрон; космический аппарат.*

**PARAMETERS OF SINGLE EVENT EFFECTS CREATED BY IONIZING RADIATION  
OF SPACE AND RADIOISOTOPE UNITS OF THE INTERPLANETARY SC**

N. M. Khamidullina\*, I. V. Zefirov, P. S. Chernikov

Joint Stock Company "Lavochkin Association"  
14a, Leningradskaya uliza, Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation  
E-mail: \* KHamidullinaNM@laspace.ru

*This report contains the results of calculation of the rate and number (probability) of random single event effects in radio electronic equipment (REE) caused by the neutron flux from onboard radioisotope heat units (RHU) based on plutonium-238 dioxide during an interplanetary flight of a spacecraft with landing on Mars.*

*Key words: single event effects – upsets and failures; integrated circuits; radio-electronic equipment; radioisotope heat units; neutron; spacecraft.*

**Введение.** На автоматических космических аппаратах (КА) для исследования дальнего космоса с целью обеспечения электропитания на большом удалении от Солнца и для поддержания теплового режима работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) применяются радиоизотопные термоэлектрические генераторы и радиоизотопные источники тепла – тепловые блоки (ТБ). Мощные потоки нейтронов от таких источников создают в РЭА, помимо дозовых эффектов, случайные одиночные эффекты (сбои и отказы), которые могут доминировать в качестве разрушающего фактора по сравнению с влиянием излучений космического пространства. Доклад посвящен анализу одиночных эффектов (ОЭ), создаваемых потоком нейтронов от бортовых ТБ в РЭА при её функционировании на борту посадочного аппарата (ПА) в межпланетном пространстве и на поверхности планеты Марс [1-2].

Радиоизотопные тепловые блоки на основе диоксида плутония-238 создают мощный поток нейтронов в диапазоне энергий от 1 МэВ до 100 МэВ, вызывающий в аппаратуре посадочных аппаратов ОЭ [3-4].

Согласно [5], расчёт частоты и числа ОЭ проводится с использованием формул:

$$v = \sigma_0 \times f_n(\geq E_0), N = \sigma_0 \times F_n(\geq E_0),$$

где  $\sigma_0$  – сечение насыщения ОЭ от нейтронов,  $\text{см}^2$ ;  $f_n(\geq E_0)$  и  $F_n(\geq E_0)$  – интегральные энергетические спектры средней плотности потока нейтронов,  $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , и потока нейтронов,  $\text{см}^2$ , соответственно;  $E_0$  – пороговое значение энергии нейтронов, МэВ.

Расчеты частоты ОЭ в ИМС с применением данных о сечениях сбоев и отказов от нейтронов [6], спектра нейтронов от диоксида плутония-238 и выхода нейтронов от ТБ [7-8] показывают, что:

– для ИМС со средним уровнем сбоеустойчивости частота одиночных сбоев, создаваемая потоком нейтронов от сборки ТБ из 8 шт., а именно, один сбой за четверо суток полёта, существенно превышает частоту сбоев от ГКЛ (от трёх до пяти сбоев за примерно два года САС), но меньше, чем при воздействии пиковых потоков мощной солнечной вспышки (от двух до пяти сбоев за 12 часов) и парировается применением программных методов;

– при использовании ИМС с сечениями насыщения отказов при воздействии нейтронов в интервале от  $10^{-10} \text{ см}^2$  до  $5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$  их ВБР лежит в диапазоне:  $0,55 \leq \text{ВБР} \leq 0,89$ , что явно недостаточно для выполнения требований по радиационной стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры. В докладе представлены основные методы парирования ОО, вызванных нейтронами ТБ.

### Библиографические ссылки

1. Features of Lunar Rover Design Considering Radiation Effects from Outer Space and Onboard Radioisotope Heat Sources / Vlasenkov E. V., Zefirov I. V., Khamidullina N. M., Kombaev T. S. // Solar System Research, 2020, vol. 54, no. 7, p. 80–87.

2. Локальные поглощенные дозы в местах расположения аппаратуры десантного модуля КА «Экзомарс-2020» от ионизирующего излучения космического пространства и радиоизотопных источников тепла / П.С. Черников, И.В. Зефилов, Е.В. Власенков и др. // Научное издание «Российский сегмент международной космической экспедиции «ЭкзоМарс-2022». Авт. сост. В.В. Ефанов. Под ред. д.т.н. В.В. Ефанова, к.э.н. Х.Ж. Карчаева. В 2-х т. Т. 1. Химки: АО «НПО Лавочкина», 2020. С. 134-145.

3. First Evaluation of Neutron Induced Single Event Effects on the CMS Barrel Muon Electronics. First Evaluation of Neutron Induced Single Event Effects on the CMS Barrel Muon Electronics / Agosteo S., Castellani L., Angelo G.D. et al. // Proceedings of the 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments, 11-15 September 2000. Cracow, Poland. P. 240-244.

4. Single Event Upsets Induced by 1-10 MeV Neutrons in Static-RAMs Using Mono-Energetic Neutron Sources / Baggio J., Lambert D., Ferlet-Cavrois V., Paillet P. et al. // IEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCES, v. 54, № 6, December 2007. P. 2149-2155.

5. РД 134-0139-2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. 2009. 78 с.

6. Чумаков А. И., Афонин А. В. Оценка энергетической зависимости сечений одиночных радиационных эффектов при нейтронном облучении // Тезисы докладов 18 научно-технической конференции «Стойкость-2015»: научно-технический сб. 2015. С. 177.

7. Хамидуллина Н. М., Зефилов И. В., Черников П.С. Анализ одиночных эффектов, создаваемых потоком нейтронов от бортовых радиоизотопных источников в радиоэлектронной аппаратуре марсианских посадочных модулей // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2022. № 1. С. 26-31.

8. Гражданская продукция организаций оборонно-промышленного комплекса. Раздел 6. Облучательные технологии. Т. 2. М.: Росатом, 2021. 188 с.

### References

1. Features of Lunar Rover Design Considering Radiation Effects from Outer Space and Onboard Radioisotope Heat Sources / Vlasenkov E. V., Zefirov I. V., Khamidullina N. M., Kombaev T. S. // Solar System Research, 2020, vol. 54, no. 7, p. 80–87.

2. Chernikov P.S., Zefirov I.V., Vlasenkov E.V. et al. [Local absorbed doses at the locations of the landing module equipment of the Exomars-2020 spacecraft from ionizing radiation of space and radioisotope heat units]. Scientific publication "Russian segment of the ExoMars-2022 international space mission". Ed. comp. V.V. Efanov. Ed. d.t.s. V.V. Efanov, Ph.D. H.J. Karchaev. In 2 volumes. V. 1. Khimki: JSC NPO Lavochkina, 2020, p. 134-145.

3. First Evaluation of Neutron Induced Single Event Effects on the CMS Barrel Muon Electronics. First Evaluation of Neutron Induced Single Event Effects on the CMS Barrel Muon Electronics / Agosteo S., Cas-

tellani L., Angelo G.D. et al. // Proceedings of the 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments, 11-15 September 2000, Cracow, Poland, p. 240-244.

4. Single Event Upsets Induced by 1-10 MeV Neutrons in Static-RAMs Using Mono-Energetic Neutron Sources / Baggio J., Lambert D., Ferlet-Cavrois V., Paillet P. et al. // IEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCES, v. 54, no. 6, December 2007, p. 2149-2155.

5. RD 134-0139-2005. *Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovaniye kosmicheskikh apparatov. Metody otsenki stoykosti k vozdeystviyu zaryazhennykh chastits kosmicheskogo prostranstva po odinochnym sboyam i otkazam* [Apparatus, devices, devices and equipment of space vehicles. Methods for assessing the hardness to the effects of space charged particles on single upsets and failures]. 2009, 78 p.

6. Chumakov A.I., Afonin A.V. *Otsenka energeticheskoy zavisimosti secheniy odinochnykh radiatsionnykh effektov pri neytronnom obluchenii* [Evaluation of the energy dependence of the cross sections of single radiation effects during neutron irradiation] // *Tezisy dokladov 18 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Stoykost'-2015»: nauchno-tekhnicheskyy sb.* [Abstracts of the 18th scientific and technical conference "Hardness-2015": scientific and technical digest]. 2015, p. 177. (In Russ.)

7. Khamidullina N. M., Zefirov I. V., Chernikov P. S. *Analiz odinochnykh effektov, sozdavayemykh potokom neytronov ot bortovykh radioizotopnykh istochnikov v radioelektronnoy apparature marsianskikh posadochnykh moduley* [Analysis of single event effects created by the neutron flux from onboard radioisotope heat units in the microcircuits of electronic equipment of the interplanetary SC with landing modules]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2022, no. 1, p. 26-31. (In Russ.)

8. *Grazhdanskaya produktsiya organizatsiy oboronno-promyshlennogo kompleksa. Razdel 6. Obluchatel'nyye tekhnologii*. [Civilian products of organizations of the military-industrial complex. Section 6. Irradiation technologies]. V. 2. M.: Rosatom, 2021. 188 p.

© Хамидуллина Н. М., Зефи́ров И. В., Черников П. А., 2022

УДК 620.1:629.68

**ПАРАМЕТРЫ ОДИНОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ, СОЗДАВАЕМЫХ ИОНИЗИРУЮЩИМИ  
ИЗЛУЧЕНИЯМИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА  
ПРИ ПОЛЕТЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КА**

П. С. Черников, Н. М. Хамидуллина\*, И. В. Зефирова

Акционерное общество «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»  
Российская Федерация, 141400, г. Химки, Московская область, улица Ленинградская, 14а  
E-mail: \*KHamidullinaNM@laspace.ru

*Доклад содержит результаты расчёта частоты и числа (вероятности) случайных одиночных эффектов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), вызываемых ионизирующими излучениями космического пространства в период межпланетного полёта космического аппарата с посадкой на Марс. Определены критерии отбора сбое- и отказоустойчивых интегральных микросхем в бортовой РЭА.*

*Ключевые слова: ионизирующее излучение космического пространства; одиночные эффекты – сбои и отказы; интегральные микросхемы; радиоэлектронная аппаратура; космический аппарат.*

**PARAMETERS OF SINGLE EVENT EFFECTS CREATED BY SPACE IONIZING RADIATION  
DURING FLIGHT OF THE INTERPLANETARY SC**

P. S. Chernikov, N. M. Khamidullina\*, I. V. Zefirova

Joint Stock Company "Lavochkin Association"  
14a, Leningradskaya uliza, Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation  
E-mail: \*KHamidullinaNM@laspace.ru

*This report contains the results of calculation of the rate and number (probability) of random single event effects in radio electronic equipment (REE) caused by space ionizing radiation during an interplanetary flight of a spacecraft with landing on Mars. The criteria for the selection of upsets-hardness and failure-hardness integrated circuits in the on-board electronic equipment were determined.*

*Keywords: space ionizing radiation; single event effects – upsets and failures; integrated circuits; radio-electronic equipment; spacecraft.*

**Введение.** Одним из важнейших условий успешного функционирования космических аппаратов (КА) для исследования планет Солнечной системы является обеспечение стойкости бортовой аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП), вызывающему радиационные эффекты различной природы: дозовые ионизационные эффекты, случайные одиночные эффекты (ОЭ), структурные повреждения и т.д. Доклад посвящен анализу одиночных эффектов (сбоев и отказов) в РЭА при её функционировании на борту КА в межпланетном пространстве и на поверхности планеты, в частности, Марса, при воздействии высокоэнергетических заряженных частиц: высокоэнергетических протонов (ВЭП) и тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) [1].

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 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 [2-4] для следующего сценария миссии: перелёт Земля – Марс занимает примерно 8 месяцев, функционирование посадочного аппарата (ПА) на Марсе – один земной год. Для оценки вклада СКЛ принимается вероятность СКЛ 99%, т.е. учтено возникновение экстремального солнечного события типа вспышки 2000 года [5].

В применяемой модели ОЭ стойкость ИМС к воздействию ТЗЧ описывается двумя параметрами:  $L_0$  – пороговое значение линейной передачи энергии (ЛПЭ) и сечение насыщения  $\sigma_0$ , а стойкость к воздействию ВЭП – следующими параметрами:  $E_0$  – пороговая энергия протона (как правило,  $E_0 = 15 - 20$  МэВ) и сечение  $\sigma_p$ .

Длительность влияния различных видов ИИ КП на протяжении полёта КА различно. Действительно, только воздействие частиц ГКЛ относится к любой точке траектории КА, сбои при воздействии частиц СКЛ происходят только во время пиковых потоков солнечной вспышки, длящихся 12–24 часов.

Критерием стойкости аппаратуры к ОС является следующее условие: она считается стойкой к воздействию ВЭП и ТЗЧ ИИ КП, если расчётная частота (число) сбоев при пиковых потоках солнечного события большой мощности не превышает предельно допустимую величину; последствия сбоев устраняются программными средствами и не приводят к нарушению выполнения задачи полета КА. Полученные результаты расчетов показывают, что для практически бессбойной работы приборов желательно использовать интегральные микросхемы со следующими параметрами сбоечувствительности:  $L_0 \geq 3$  МэВ/(мг·см<sup>2</sup>) и  $\sigma_0 \leq 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/бит.

Для анализа ОО используют понятие вероятности одиночных отказов  $P(t)$ , которая, как и в теории надежности, определяется на основе пуассоновского закона распределения по формуле

$$P(t) = 1 - \exp(-vt) \approx vt = N \ll 1,$$

где  $v$  – частота одиночных отказов ИМС;  $t$  – время действия потока частиц;  $N$  – количество отказов за промежуток времени  $t$ .

Соответственно, вероятность безотказной работы (ВБР) рассчитывается по формуле: ВБР =  $1 - P(t) = \exp(-vt)$ .

Расчет показывает, что для РЭА условие ВБР  $\geq 0,999$  выполняется при использовании ИМС со следующими характеристиками отказочувствительности:

$$L_0 \geq 20 \text{ МэВ/(мг·см}^2\text{)}, \sigma_0 \leq 10^{-2} \text{ см}^2\text{/ЭРИ.}$$

При условии ВБР  $\geq 0,99$  возможно применение менее отказоустойчивых ИМС со следующими характеристиками:  $L_0 \geq 15$  МэВ/(мг·см<sup>2</sup>),  $\sigma_0 \leq 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/ЭРИ.

### 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. Кузнецов Н. В. Частота одиночных случайных эффектов в электронике на борту космических аппаратов // Космические исследования. 2005. Т. 43. № 6. С. 443–451.
3. Новые наукоемкие технологии в технике: энциклопедия. Т. 16. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под общ. ред. К.С. Касаева. М.: ЗАО НИИ «Энцитех», 2000. 295 с.
4. Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов / Н. В. Кузнецов, Ю. М. Малышкин, Р. А. Ныммик и др. // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 2. С. 72–78.
5. Хамидуллина Н. М. Радиационная обстановка на трассе полета КА «ЭкзоМарс-2022» // научное издание «Российский сегмент международной космической экспедиции «ЭкзоМарс-2022» / Авт. сост. В. В. Ефанов. Под ред. д.т.н. В. В. Ефанова, к.э.н. Х.Ж. Карчаева. В 2-х т. Т. 1. Химки: АО «НПО Лавочкина», 2020. С. 128–133.

### 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. 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.)
3. *Novyye naukoemkiye tekhnologii v tekhnike: entsiklopediya. T. 16. Vozdeystviye kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovaniye kosmicheskikh apparatov* [New science-intensive technologies in engineering: an encyclopedia. V. 16. Influence of the space environment on the materials and equipment of spacecrafts]. Ed. K.S. Kasaeva. M.: CJSC NII "Entsitekh", 2000. 295 p.
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 radioelektronnuyu apparaturu*. 2011. Issue. 2. P. 72-78 (In Russ.).
5. Khamidullina N.M. *Radiatsionnaya obstanovka na trasse poleta KA «EkzoMars-2022»* [Radiation environment on the flight trajectory of the ExoMars-2022 spacecraft]. *Nauchnoye izdaniye «Rossiyskiy segment mezhdunarodnoy kosmicheskoy ekspeditsii «EkzoMars-2022»* [Scientific publication "Russian segment of the ExoMars-2022 international space mission"]. Ed. comp. V.V. Efanov. Ed. d.t.s. V.V. Efanov, Ph.D. H.J. Karchaev. In 2 volumes. V. 1. Khimki: JSC NPO Lavochkina, 2020. P. 128-133.

© Черников П. А., Хамидуллина Н. М., Зефилов И. В., 2022



**Секция**

**«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 539.3

## МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ КА \*

А. В. Азин<sup>1\*</sup>, С. В. Пономарев<sup>1</sup>, С. В. Рикконен<sup>1</sup>, Н. Н. Марицкий<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>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*Рассматривается проблема оценки долговечности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического аппарата (КА) на основе выявленных латентных дефектов печатных плат. Актуальность вызвана повышенными требованиями к надежности и долговечности РЭА КА. Погрешность прогнозирования ресурса РЭА разработанным методом не превышает 5 %.*

*Ключевые слова: латентный дефект, печатная плата, метод неразрушающего контроля, космический аппарат, надежность.*

## METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF SPACECRAFT RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT\*

A. V. Azin<sup>1</sup>, S. V. Ponomarev<sup>1</sup>, S. A. Ponomarev<sup>1</sup>, N. N. Maritsky<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>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems

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

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*The problem of assessing the durability of spacecraft radio-electronic equipment is considered. The relevance is caused by the technological imperfection of the tests. The error in predicting the resource of radio-electronic equipment does not exceed 5 %.*

*Keywords: latent defect, printed circuit board, non-destructive testing method, printed circuit board, spacecraft, reliability.*

Срок эксплуатации радиоэлектронного оборудования напрямую зависит от выбора материалов, от качества изготовления конструкции и условий эксплуатации.

Общей тенденцией в развитии радиоэлектронной техники является сочетание все большей интеграции выполняемых ею функций с все большей ее микроминиатюризацией. Следствием этого является резкое усложнение конструкций современной печатной платы (ПП) и технологических процессов ее изготовления. Так, технология изготовления современных микросхем и ПП практически не допускает корректировки их структуры и параметров в процессе изготовления, проще создать новую микросхему, чем скорректировать уже имеющуюся. Это резко уменьшает возможность экспериментальной доводки (наладки и оптимизации) и, соответственно, требует своевременной отработки основных вопросов технологичности конструкций ПП и вопросов повышения надежности технологических процессов ее изготовления.

---

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

Неразрушающие методы контроля позволяют выявлять дефекты паяных соединений многовыводных микросхем, но для прогнозирования ресурса ПП требуются дополнительные исследования влияния найденных дефектов на целостность паяных соединений с учетом характера вероятных эксплуатационных нагрузок.

Работа направлена на разработку метода неразрушающего контроля радиоэлектронного оборудования и его комплектующих. Данный метод должен позволять выявить скрытые дефекты в конструкции ПП и спрогнозировать ресурс работы этой ПП с учетом характера вероятных нагрузок при ее эксплуатации.

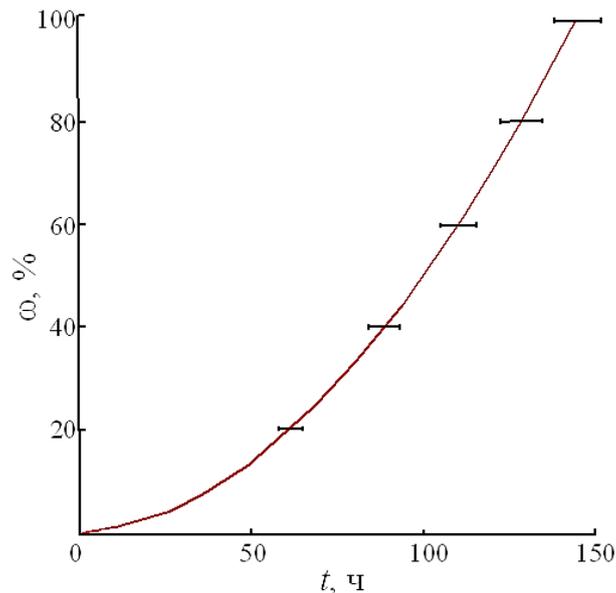
В работе [1] исследователями изложена концепция поиска и выявления местоположения латентных дефектов в конструкции электронных плат на основе метода акустической эмиссии.

Для оценки долговечности используется метод рентгеновской томографии, в части определения геометрических размеров дефекта и направления его распространения, и метод численного моделирования, в части оценки напряженно-деформированного состояния паяных соединений, содержащих обнаруженные дефекты, и прогноза долговечности ПП на основе функции повреждаемости [2].

В методе неразрушающего контроля прогнозирование долговечности осуществляется при помощи функции поврежденности материала, экспериментальной кривой усталостной прочности материалов ПП, учета реологических свойств материалов ПП, влияния температуры и сложного напряженно-деформированного состояния на ПП в течении САС КА [3]. Для верификации результатов численного анализа предложенного метода использованы опубликованные экспериментальные данные компании Collins Aerospace [4].

Для прогнозирования ресурса работы ПП с обнаруженными дефектами проведена оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) численной модели экспериментального образца ПП из [4] в программном пакете ANSYS Mechanical. В задаче НДС ПП определялось при температурном цикле: от  $-55$  до  $+125$  °С с 15-минутной выдержкой при максимальной и минимальной температуре, скорость охлаждения и нагрева составляет  $10$  °С/мин [5].

Результаты расчета, полученные с помощью метода неразрушающего контроля радиоэлектронного оборудования КА, представлены на рисунке в виде графика функции повреждаемости дефектного паяного соединения. Таким образом, при частоте теплового цикла равной 1 цикл за 30 минут время работы ПП с таким дефектным паяным соединением составит 288 циклов, что на 4.3 % расходится с экспериментальными результатами из [4].



Функция накопления повреждений дефектного паяного соединения

Данный метод может применяться на производстве при изготовлении ПП, отработке новых решений перед серийным производством. Также метод применим для оценки ресурса оборудования в процессе эксплуатации.

## Библиографические ссылки

1. Разработка метода выявления латентных дефектов паяных соединений и прогнозирование их долговечности в течение САС КА / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. А. Пономарев, Н.Н. Марицкий, С.Б. Сунцов // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2021, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2021. С. 370–371.
2. Nondestructive testing method for a new generation of electronics / A. Azin, A. Zhukov, A. Narikovich et al. // MATEC Web of Conferences (YSSIP-2017). Vol. 143, no. 04007. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814304007>.
3. Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем / А. В. Азин, Н. Н. Марицкий, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2022. № 76. С. 43–56. DOI: 10.17223/19988621/76/4.
4. The last will and testament of the BGA void / D. Hillman, D. Adams, T. Pearson, B. Williams, B. Petrick, R. Wilcoxon // 2011. 15 p.
5. Finite element analysis of the effect of silver content for Sn–Ag–Cu alloy compositions on thermal cycling reliability of solder die attach / K.C. Otiaba, R.S. Bhatti, N.N. Ekere, S. Mallik, M. Ekpu // Engineering Failure Analysis. 2013. V. 28. P. 192–207. DOI :10.1016/j.engfailanal.2012.10.008.

## References

1. Azin A. V., Ponomarev S. V., Ponomarev S. A., Maritsky N. N., Suntsov S. B. [Development of a method for detecting latent defects in solder joints and durability prediction in term of the spacecraft active existence] *Materialy XXV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2021, p. 370–371. (In Russ.).
2. Azin A., Zhukov A., Narikovich A., Ponomarev S., Rikkonen S., Leitsin V. Nondestructive testing method for a new generation of electronics. *MATEC Web of Conferences (YSSIP-2017)*, Vol. 143, no. 04007, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814304007>.
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, С. 43–56, DOI: 10.17223/19988621/76/4. (In Russ.).
4. Hillman D., Adams D., Pearson T., Williams B., Petrick B., Wilcoxon R. [The last will and testament of the BGA void] 2011. 15 p.
5. Otiaba K.C., Bhatti R.S., Ekere N.N., Mallik S., Ekpu M. [Finite element analysis of the effect of silver content for Sn–Ag–Cu alloy compositions on thermal cycling reliability of solder die attach] *Engineering Failure Analysis*, 2013, 28. pp. 192–207. DOI : 10.1016/j.engfailanal.2012.10.008.

© Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Марицкий Н. Н., Сунцов С. Б., 2022

УДК 621.3.019.3

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ОБЖИМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Городилов<sup>1</sup>, Э. В. Семёнов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40  
E-mail: gorod@iss-reshetnev.ru

*Приведены результаты моделирования линии передачи, содержащей неоднородность в виде индуктивности и сопротивления при значениях аналогичных параметрам обжимных соединений. Показано, что при импульсных измерениях нелинейные свойства некачественных обжимных соединений, позволяют обнаруживать такие соединения. На основании полученных данных предложены пути совершенствования методов неразрушающего контроля, позволяющие выявлять дефектные обжимные электрические соединения в кабельных изделиях.*

*Ключевые слова: обжимные электрические соединения, испытания, электрические характеристики, рефлектограмма.*

## THE USE OF NONLINEAR PROPERTIES OF CRIMP JOINTS IN QUALITY CONTROL CABLE PRODUCTS OF SPACE

A. Gorodilov<sup>1</sup>, E. Semyonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company M. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Krasnoyarskii krai, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenin av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: gorod@iss-reshetnev.ru

*The results of modeling a transmission line containing inhomogeneity in the form of inductance and resistance at values similar to the parameters of crimp connections are presented. It is shown that with pulse measurements, the nonlinear properties of low-quality crimp joints allow detecting such connections. Based on the data obtained, the ways of improving the methods of non-destructive testing, allowing to identify defective crimp electrical connections in cable products, are proposed.*

*Keywords: crimped electrical connections, tests, electrical characteristics, reflectogram.*

Важнейшим фактором, обеспечивающим функционирование космической техники, является надежность электрических цепей. Среди множества факторов, влияющих на их надежность, одним из важнейших является надежность контактных соединений [1]. Одними из часто применяемых при производстве кабельных изделий сегодня являются обжимные контакты, в которых соединение провода и контакта выполняется методом опрессовки. Существуют различные способы контроля качества подобных контактных соединений [2-5]. Очевидно, что для контроля параметров уже изготовленных кабельных изделий, а также изделий, находящихся в процессе эксплуатации, содержащих обжимные соединения применение разрушающих методов контроля неприемлемо. В то же время специфика конструкции кабелей с большим количеством контактов ограничивает применение известных методов неразрушающего контроля.

Авторами был проведен анализ результатов работ, отражающих динамику изменения переходного сопротивления обжимных соединений и зависимостей дифференциального сопротивления от проте-

кающего тока. [4,6]. Как установлено переходное омическое сопротивление для качественно обжатых контактов имеет очень маленькую величину и в процессе эксплуатации изменяется незначительно. При рассмотрении зависимости дифференциального сопротивления от тока наблюдается повышение нелинейности дифференциального сопротивления, но контроль величины такого изменения представляется сложной.

Авторами было проведено компьютерное моделирование линии передачи, содержащей неоднородность в виде индуктивности и сопротивления при значениях аналогичных параметрам обжимных соединений. На рис. 1 представлена схема модели линии передачи, содержащей два отрезка коаксиального кабеля соединенных между собой через индуктивность и сопротивление, имитирующие неоднородность контактного соединения. Параметры индуктивности и сопротивления близки по величине к реальным параметрам обжимных соединений.

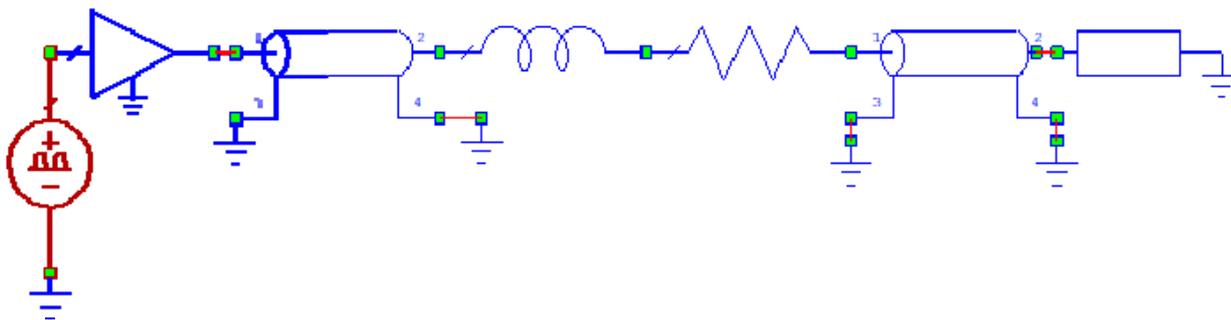


Рис. 1. Схема модели линии передачи

На рис. 2 показаны отраженные сигналы при различных значениях индуктивности. Красным цветом показаны параметры при индуктивности 1 нН, синим цветом показаны параметры при индуктивности 2 нН.

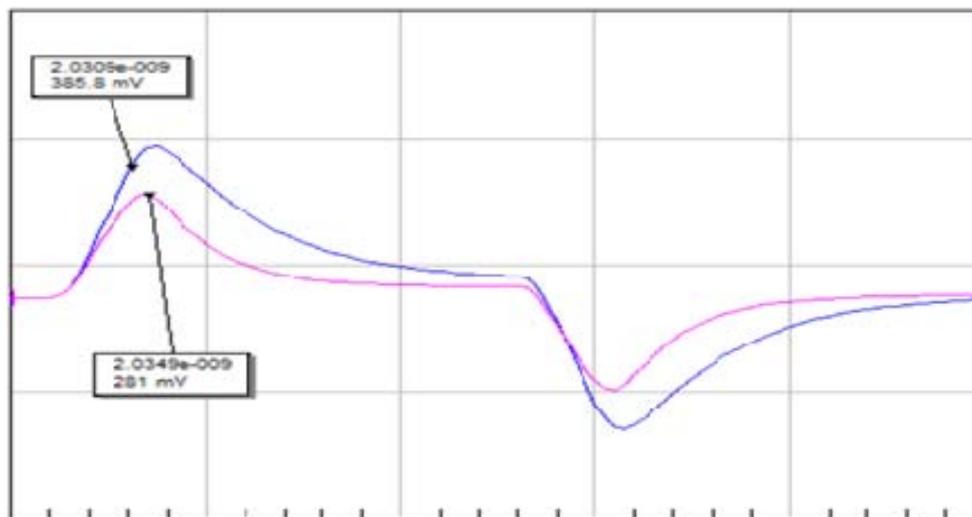


Рис. 2. Отраженные сигналы при различных значениях индуктивности

Как можно заметить изменение индуктивности вызывает изменение амплитуды отраженного импульса. Приведенные результаты подтверждают нелинейный характер изменения параметров обжимного соединения и позволяют сделать вывод о необходимости дальнейших исследований в этом направлении в целях диагностики обжимных соединений.

Использование нелинейности параметров реальных электрических обжимных соединений и возможность измерения таких параметров, представляет практический интерес с точки зрения совершенствования методов неразрушающего контроля и диагностики электрических соединений

в космической технике. Дальнейшее изучение изменения нелинейных свойств обжимных соединений, в том числе с применением внешних воздействий, позволят совершенствовать уже известные методы.

Актуальной представляется задача создания компьютерной модели, отражающей нелинейные свойства обжимного соединения. Такая модель позволит проводить более точный анализ линий передачи и может быть использована при разработке средств неразрушающего контроля качества кабельных изделий космической техники.

### Библиографические ссылки

1. Васильев И. С., Ким В. С., Ефремов С. В. «Надежность электрических соединений в бортовой кабельной сети перспективных космических аппаратов» / «Науковедение». 2013. № 3
2. Дзекцер Н. Н. Методы испытаний и диагностики электрических контактных соединений / Н. Н. Дзекцер, Г. Ю. Авраменко // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин. Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. Н.Б. Демкина. Тверь: ТГТУ, 2006. С. 187–192.
3. Солдатов Д. А., Солдатова Е. С., Костина М. А., Шульгин Е. М. «Диагностика электрических контактных соединений.» // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 348-349.
4. Васильев И. С., Ефремов С.В., Сунцов С.Б., Ким В.С. «Проведение испытаний обжимных электрических соединений с целью определения их свойств и надежности» Решетневские чтения. 2013. Т. 1. С. 312-314.
5. Ф.Н. Пеплин, М. В. Прохоров «Электротермические испытания обжимных соединений кабеля» // Тенденции развития науки и образования, 2019 № 51-7– С. 24-27.
6. Городилов А. А., Вторых В. С., Семенов Э. В. «Нелинейность контактного сопротивления обжимных соединений и диагностика бортовых кабелей» В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2021. С. 378-379.

### References

1. Vasiliev I. S., Kim V. S., Efremov S. V. "Reliability of electrical connections in the onboard cable network of promising spacecraft" / "Naukovedenie". 2013. № 3
2. Dzektser N. N. Methods of testing and diagnostics of electrical contact connections / N. N. Dzektser, G. Yu. Avramenko // Mechanics and physics of processes on the surface and in contact with solids and machine parts. Mezhvuz. sb. nach. tr. / Ed. by N. B. Demkin. Tver: TSTU, 2006. p. 187-192.
3. Soldatov D. A., Soldatova E. S., Kostina M. A., Shulgin E. M. "Diagnostics of electrical contact connections." // Reshetnev readings. 2018. Vol. 1. pp. 348-349.
4. Vasiliev I.S., Efremov S.V., Suntsov S.B., Kim V.S. "Testing of crimp electrical connections to determine their properties and reliability" Reshetnev readings. 2013. Vol. 1. pp. 312-314.
5. F. N. Peplin, M. V. Prokhorov "Electrothermal tests of cable crimping connections" //Trends in the development of science and education, 2019 No. 51-7-pp. 24-27.
6. Gorodilov A. A., Vtoryh V. S., Semenov E.V. "Nonlinearity of contact resistance of crimp connections and diagnostics of onboard cables" In the collection: Reshetnev readings. Materials of the XXV International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts. Under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Krasnoyarsk, 2021. pp. 378-379.

© Городилов А. А., Семёнов Э. В., 2022

## ВАКУУМНО-ОТКАЧНЫЕ СИСТЕМЫ

А. А. Горяйнова<sup>1\*</sup>, Я. В. Миронович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Кирова, 12а

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

Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

E-mail: \*goryajnova.2000@mail.ru

*В статье раскрывается понятие вакуумно-откачных систем, приводятся типы насосов, предназначенные для создания различных степеней вакуума. Данные системы используются в проведении испытаний узлов и агрегатов космических аппаратов.*

*Ключевые слова: вакуумно-откачная система, создание вакуума, винтовые насосы форвакуумные насосы, насосы Рутса, турбомолекулярные насосы, криогенные насосы.*

## VACUUM PUMPING SYSTEMS

A. A. Goryainova<sup>1\*</sup>, Y. V. Mironovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

12a, Kirova Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662971, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC "Information Satellite Systems" named after Academician M. F. Reshetnev"

52, Lenina Str/, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation

E-mail: \*goryajnova.2000@mail.ru

*The article reveals the concept of vacuum pumping systems, provides types of pumps designed to create various degrees of vacuum. These systems are used in testing spacecraft unit and assemblies.*

*Keywords: vacuum pumping system, vacuum creation, screw pumps, pre-vacuum pumps, Roots pumps, turbomolecular pumps, cryogenic pumps.*

**Введение.** Вакуум представляет собой разреженный газ или его соответствующее состояние, при котором его давление и плотность являются ниже, чем давление и плотность окружающей атмосферы. Поскольку атмосферное давление колеблется в пределах определенной местности над поверхностью Земли и снижается по мере повышения высоты над уровнем моря, то невозможно определить общий верхний предел диапазона вакуума [1].

В основу получения вакуума могут быть положены два принципа: первый – удаление газа из откачиваемого сосуда за пределы вакуумной системы, второй – связывание газа в вакуумной системе.

Для получения и поддержания вакуума служат вакуумные системы, представляющие собой совокупность устройств для создания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также сосудов и связывающих их трубопроводов. Наиболее важными элементами, составляющими основу вакуумной системы, являются устройства для создания вакуума, называемые вакуумными насосами и служащие для удаления газа из откачиваемого сосуда. Уменьшение молекулярной концентрации газа в откачиваемом сосуде представляет собой процесс откачки.

В настоящее время вакуумно-откачные системы широко используют в различных отраслях промышленности для обеспечения технологических процессов или обеспечения работы установок различного назначения. Так их используют в установках имитации космического пространства при проведении наземных испытаний космических аппаратов.

**Классификация вакуумных насосов.** Среди вакуумных насосов выделяют вакуумные насосы газоперекачивающие и основанные на поглощении газа. Газоперекачивающие вакуумные насосы могут

использоваться без ограничений, а вакуумные насосы, основанные на поглощении газа, характеризуются ограниченной газопоглощаемостью и требуют восстановления в определенные интервалы времени в зависимости от технологического процесса.

**Пластинчато-роторные вакуумные насосы.** Пластинчато-роторный вакуумный насос представляет собой роторный вытесняющий насос с масляным уплотнением. Насосная система состоит из корпуса, внецентренно установленного ротора, лопастей,двигающихся радиально под силой сжатия пружины, а также входа и выхода. Выпускной клапан имеет масляное уплотнение. Впускной клапан разработан по подобию вакуумного предохранительного клапана и при работе всегда находится в открытом состоянии. Рабочая камера расположена внутри корпуса. Ротор и лопасти разделяют рабочую камеру на два отдельных, разных по объему отсека. После включения ротора газ поступает в расширяющую камеру всасывания до тех пор, пока его не перекроет второй лопастью. Газ внутри камеры сжимается, пока не откроется выпускной клапан под атмосферным давлением. [2].

**Винтовые вакуумные насосы.** Два параллельных взаимно зацепленных винтовых ротора на подшипниковой опоре с противоположной резьбой, синхронно и бесконтактно вращающиеся в противоположные стороны, герметично закрытые в цилиндрическом корпусе, образуют многоступенчатый насос. Вследствие противовращения двух роторов изолированные объемы в каждой винтовой канавке продвигаются вдоль роторов к выходу. Нанос не имеет клапанов ни на входе, ни на выходе. В момент, когда рабочий объем цилиндра достигает выпускного отверстия, давление равно атмосферному. Это означает, что атмосферный воздух проникает в рабочий объем и затем вновь выпускается по мере вращения ротора [3]. Вытеснение и сжатие газа происходит за счет того, что винтообразный ротор вращается внутри статора, имеющего соответствующую форму. Благодаря винтовым выступам, вдоль оси ротора образуются винтовые канавки, создающие замкнутые пространства, поэтому перекачиваемый поток движется только в одном направлении. Газ постепенно сжимается и удаляется через выпускной клапан. В зависимости от конструкции, винтовые насосы могут иметь 1,2 и более винтов.

**Форвакуумные насосы.** В качестве форвакуумных насосов могут использоваться пластинчато-роторные насосы, роторнопоршневые насосы или винтовые насосы. Данные типы комбинированных насосов могут применяться во всех областях, где требуются низкий и средний вакуум и высокие скорости откачивания. В качестве форвакуумных насосов также могут использоваться жидкостно-кольцевые насосы [4].

**Вакуумные насосы Рутса.** Вакуумные насосы Рутса относятся к категории роторных вытесняющих вакуумных насосов, работающих на сухом ходу. Их также называют насосами Рутса или нагнетателями Рутса. В насосах Рутса два синхронно противоположно вращающихся ротора вращаются бесконтактно в одиночном корпусе. Роторы имеют конфигурацию в виде восьмерки и отделяются друг от друга узким зазором. Принцип действия роторов аналогичен работе шестеренчатого насоса с двузубчатым колесом, который откачивает газ из впускного канала в выпускной канал. Один вал приводится в движение двигателем. Другой вал синхронизируется с помощью зубчатой пары в приводной камере. Зона смазывания ограничивается двумя приводными камерами с подшипником, которые изолированы от камеры всасывания лабиринтными уплотнениями. Благодаря отсутствию трения в камере всасывания вакуумный насос Рутса способен функционировать при высоких скоростях вращения (1500–3000 об/мин).

**Турбомолекулярные насосы.** Турбомолекулярные вакуумные насосы относятся безмасляным (сухим) молекулярным (механическим) устройствам. Конструкция насоса не предполагает наличия масла, соответственно, такие насосы широко используются в местах, где нежелательно попадание масляных испарений в воздушный или газовый поток, насосы активно используются в различных промышленных секторах и даже в области научных исследований [5].

Эффект откачивания установки, состоящей из лопастей ротора и статора, обусловлен передачей импульсов от быстро вращающихся лопастей к откачиваемым молекулам газа. Молекулы, ударяясь о лопасти, адсорбируются к ним и через определенный промежуток времени вновь их покидают. В ходе данного процесса скорость лопастей суммируется с тепловой скоростью молекул.

Турбомолекулярный насос не способен самостоятельно создать вакуум из атмосферного давления, поэтому, чаще всего, он выполняет свои функции в связке с формвакуумным насосом. В этой связке формвакуумный насос осуществляет предварительную откачку вакуумной системы и эвакуацию выхлопных газов турбомолекулярного насоса.

**Криогенные насосы.** Криогенные насосы относятся к категории безмасляных высоковакуумных адсорбционных насосов. Предельное давление остаточных газов, которое может быть достигнуто с использованием криогенного насоса,  $\sim 1 \times 10^{-11}$  Торр. Откачка криогенным насосом происходит за счет конденсации газов и паров поверхностью, охлажденной до сверхнизких (гелиевых) температур. Количество газов и паров, которые могут быть сконденсированы в криогенном насосе ограничено, поэтому одним из важных параметров является "емкость" ("capacity") – количество газа, которое может захватить насос без изменения рабочих параметров, определяется в бар\*л или аналогичных. Время работы до регенерации может составлять до 2 недель, а при отсутствии газовой нагрузки и заметно дольше.

Для захлаживания криогенного насоса необходим внешний гелиевый компрессор, работающий по замкнутому циклу [6].

#### Библиографические ссылки

1. Pfeiffer-vacuum.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/introduction-to-vacuum-technology/general/vacuum-definition> (дата обращения: 29.09.2022).
2. Pfeiffer-vacuum.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/rotary-vane-vacuum-pumps/design-operating-principle> (дата обращения: 29.09.2022).
3. Pfeiffer-vacuum.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/screw-vacuum-pumps/design-operating-principle> (дата обращения: 29.09.2022).
4. Tec-prom.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://tek-prom.ru/forvakuumnyj-nasos> (дата обращения: 29.09.2022).
5. Topvacuum.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://topvacuum.ru/turbomolekulyarnye-vakuumnye-nasosy-printsip-raboty-i-oblasti-primeneniya-etih-nasosov> (дата обращения: 29.09.2022).
6. Avacuum.ru [Электронный ресурс]. URL: [https://avacuum.ru/rus/techinfo/vacuum\\_pumps/cryopumps](https://avacuum.ru/rus/techinfo/vacuum_pumps/cryopumps) (дата обращения: 29.09.2022).
7. Вакуумная техника: справочник / Е.С Фролов, В.Е Минайчев, А.Т. Александрова и др. // под общ. ред. Е.С Фролова, В.Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1992. 249 253 с.

#### References

1. Pfeiffer-vacuum.com. Available at: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/introduction-to-vacuum-technology/general/vacuum-definition> (accessed 29.09.2022).
2. Pfeiffer-vacuum.com. Available at: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/rotary-vane-vacuum-pumps/design-operating-principle> (accessed 29.09.2022).
3. Pfeiffer-vacuum.com. Available at: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/screw-vacuum-pumps/design-operating-principle> (accessed 29.09.2022).
4. Tec-prom.ru. Available at: <https://tek-prom.ru/forvakuumnyj-nasos> (accessed 29.09.2022).
5. Topvacuum.ru. Available at: <https://topvacuum.ru/turbomolekulyarnye-vakuumnye-nasosy-printsip-raboty-i-oblasti-primeneniya-etih-nasosov> (accessed 29.09.2022).
6. Avacuum.ru. Available at: [https://avacuum.ru/rus/techinfo/vacuum\\_pumps/cryopumps](https://avacuum.ru/rus/techinfo/vacuum_pumps/cryopumps) (accessed 29.09.2022).
7. Frolov E.S, Minaichev V.E, Aleksandrova A.T. et al. [Mechanical engineering]. 1992, p.249 253.

© Горяйнова А. А., Миронович Я. В., 2022

УДК 621.315

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Ковкин, Н. В. Москаленко, Ю. А. Кремзуков

Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники («НИИ АЭМ ТУСУР»)  
Российская Федерация, 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53  
E-mail: kovkin@niaem.tomsk.ru

*Рассмотрен процесс наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов. Описана структура автоматизированной системы контроля энергопреобразующей аппаратуры. Предложен способ программно-аппаратной реализации контроля сопротивления изоляции.*

*Ключевые слова: система электропитания, наземные испытания, автоматизированная система контроля, сопротивление изоляции, метод трех вольтметров.*

## AUTOMATED INSULATION CONTROL IN SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEMS

I. V. Kovkin, N. V. Moskalenko, Ju. A. Kremzakov

Research Institute of Automation and Electromechanics  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR)  
53, Belinsky Str., Tomsk, 634034, Russian Federation  
E-mail: kovkin@niaem.tomsk.ru

*The paper considers processes of ground testing of spacecraft power supply systems. The structure of the automated control system for energy-converting equipment is described. A method for hardware-software implementation of transmission resistance control is proposed.*

*Keywords: supply system, ground tests, automatic control system, insulation resistance, three voltmeter method.*

В основе платформы любого космического аппарата (КА) лежит система электропитания (СЭП), обеспечивающая выработку, накопление и распределение электрической энергии. Являясь базовым элементом КА, СЭП во многом определяет срок его активного существования, показатели надежности и эффективности. Зачастую к аварийным ситуациям приводят невыявленные до полета дефекты, возникающие при создании или проектировании энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) [1]. Поскольку мощность СЭП и срок активного существования КА с каждым годом неизменно увеличиваются, повышаются и требования к надежности данного модуля. В связи с этим перед запуском КА в наземных условиях необходимо проводить испытания как отдельных блоков СЭП, так и всей системы в целом.

В процессе наземных испытаний важно отработать все способы передачи электроэнергии через ЭПА с использованием генерирующего (солнечная батарея), накапливающего (аккумуляторная батарея) и потребляющего (обобщенная нагрузка) элементов. Однако применение бортовых модулей КА, а также всего комплекса нагрузок требует огромных затрат [2]. Наиболее оптимальным является метод имитационно-физического моделирования, при котором отдельные элементы СЭП заменяются специальными имитаторами.

Чтобы воспроизводить реальные режимы работы СЭП КА, все устройства имитации и ЭПА должны работать совместно в рамках единой системы. С этой целью применяется автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры (АСК ЭПА), которая позволяет наблюдать

и контролировать процесс входных испытаний, а также проводить экспериментальную обработку СЭП в автоматизированном режиме [3].

Для обеспечения надежной и безопасной работы АСК ЭПА в процессе испытаний необходимо контролировать характеристики изоляции основных токоведущих шин и кабелей. Помимо выполнения защитных функций контроль изоляции может применяться для определения технической неисправности ЭПА, связанной со снижением сопротивления изоляции менее допустимых значений в процессе испытаний [4]. Таким образом, возникает необходимость разработать и внедрить в АСК подсистему автоматизированного контроля изоляции.

В целях достижения наибольшей эффективности данная подсистема должна быть интегрирована в структуру АСК в качестве отдельного модуля, позволяющего взаимодействовать с ним по общим каналам связи. Решение данной задачи подразумевает создание устройства контроля изоляции (УКИ), функционирующего внутри контрольно-испытательной станции (КИС) из состава АСК ЭПА [5] и обеспечивающего выполнение следующих задач:

- определение значений сопротивления изоляции общей обеспечивающей шины СЭП в одном из трех диапазонов: 100 кОм, 1 МОм и 10 МОм;
- автоматическая защита от недопустимого снижения сопротивления изоляции;
- контроль температуры окружающей среды.

Исходя из основных функций проектируемого устройства, можно составить его обобщенную структуру, представленную на рис. 1.

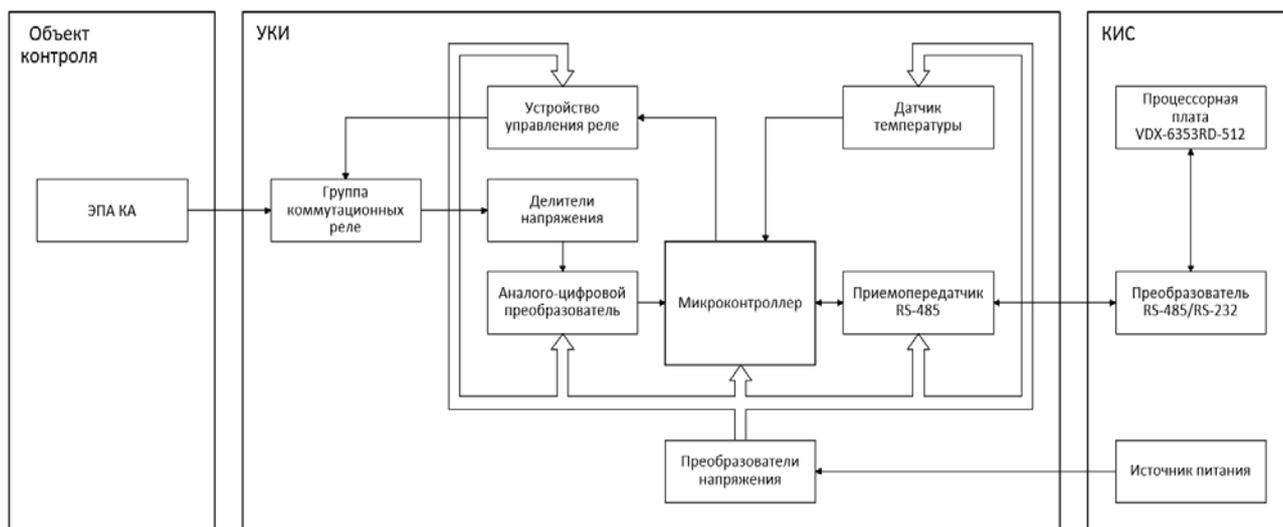


Рис. 1. Обобщенная структура УКИ

Для определения сопротивления изоляции в УКИ используется метод трех вольтметров, который основан на измерении следующих величин: напряжение шины питания  $U$ , напряжение между корпусом и положительной шиной  $U_+$ , напряжение между корпусом и отрицательной шиной  $U_-$ . Данный способ определения сопротивления изображен на рис. 2.

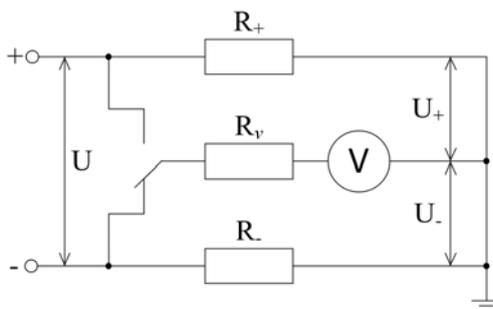


Рис. 2. Способ определения сопротивления изоляции методом трех отсчетов вольтметра

Далее на основе полученных значений производится расчет величин сопротивления изоляции отдельных полюсов сети по следующим формулам:

$$R_+ = R_v \left( \frac{U - U_+}{U_-} - 1 \right); R_- = R_v \left( \frac{U - U_-}{U_+} - 1 \right),$$

где  $R_+$  – сопротивление изоляции относительно положительной шины,  $R_-$  – сопротивление изоляции относительно отрицательной шины,  $R_v$  – внутреннее сопротивление вольтметра.

Применение УКИ в составе КИС позволит в автоматизированном режиме осуществлять контроль ухудшения свойств изоляции и скорости ее деградации, а также предотвращать аварийные ситуации. Результатом станет сокращение затрат рабочего времени и расширение области исследований ЭПА КА.

### Библиографические ссылки

1. Куренков В. И., Волоцув В. В. Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники. Самара: Самар. гос. аэрокосмический ун-т, 2010. 55 с.
2. Юдинцев А. Г. Энергопреобразующие комплексы для наземной отработки и подтверждения прогнозируемой надёжности систем электропитания космических аппаратов // Доклады ТУСУРа. 2019. №3(22). С. 95-102.
3. Казанцев Ю. М., Кремзуков Ю. А. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры СЭП КА // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. 2009. Т. 314, № 4. С. 138–141.
4. Niu Y., Sun Z., Cheng S. [and etc] Research on insulation resistance test for missile cables based on PC104 system // 2010 International Conference On Computer Design and Applications. 2010. Vol. 3. P. 222-224.
5. Шурыгин Ю. А., Мишин В. Н., Кремзуков Ю. А. Аппаратно-программный комплекс автоматизации процессов предстартовых испытаний систем энергообеспечения космических аппаратов // Доклады ТУСУРа. 2011. №2-1(24). С. 305-309.

### References

1. Kurenkov V. I., Volotsuev V. V. *Nadjozhnost' izdelij i sistem raketno-kosmicheskoy tehniki*. [Reliability of products and systems of rocket and space technology]. Samara, Samar. gos. aerokosmicheskyy un-t, 2010, 55 p.
2. Judincev A. G. [Energy-converting complexes for ground testing and confirmation of the predicted reliability of spacecraft power supply systems]. *Doklady TUSURa*. 2019, No. 3(22), P. 95-102 (In Russ).
3. Kazantsev Y. M., Kremzukov Y. A. [Automated control system for energy-converting equipment SEP KA]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Jenergetika*. 2009, Vol. 314, No. 4, P. 138–141 (In Russ).
4. Niu Y., Sun Z., Cheng S. Research on insulation resistance test for missile cables based on PC104 system. *2010 International Conference On Computer Design and Applications*. 2010, Vol. 3. P. 222-224.
5. Shurygin Ju. A., Mishin V. N., Kremzukov Ju. A. [Hardware-software complex for automating the processes of pre-launch testing of spacecraft power supply systems]. *Doklady TUSURa*. 2011, No. 2-1(24), P. 305-309 (In Russ).

© Ковкин И. В., Москаленко Н. В., Кремзуков Ю. А., 2022

УДК 621

## ОСОБЕННОСТИ ВЕРИФИКАЦИИ СЕРВОПРИВОДОВ

Д. А. Феоктистов, Т. Г. Орешенко, Е. Г. Баранова, М. С. Федоров, А. Д. Широков

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

*В данной статье описываются проблемы, возникшие при приобретении сервоприводов малой мощности. Показана необходимость введения алгоритма входного контроля.*

*Ключевые слова: сервоприводы, входной контроль, обеспечение характеристик.*

## FEATURES OF SERVOS VERIFICATION

T. G. Oreshenko, E. G. Baranova, D. A. Feoktistov, M. S. Fedorov, A. D. Shirokov

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

*This article describes the problems encountered when purchasing low-power servos. The necessity of introducing an input control algorithm is shown.*

*Keywords: servos, input control, performance assurance.*

При выполнении одного из студенческих проектов была установлена необходимость ужесточения входного контроля покупных сервоприводов. В данном проекте используются 6 сервоприводов. Согласно техническому заданию, в данном проекте нужно было реализовать движение руки по известному образцу движения руки человека. Для этого использовались камера, язык программирования Python и нейросеть Mediarpipe совместно с Arduino IDE. Для питания и управления приводами во время их проверки применялась плата Arduino Uno.

Так входной контроль сервоприводов для применения в студенческих проектах производился в следующем объеме:

- контроль сопроводительной документации, комплектности и упаковки;
- контроль внешнего вида;
- контроль параметров ТУ или datasheet.

Для проекта были приобретены сервоприводы MG996R. При входном контроле двигателей возникло две проблемы. Во-первых, выяснилось, что половина из них неработоспособна.

Вторая проблема заключалась в значительном разбросе напряжения трогания приводов – если для одного нужно было всего 4,9 В, то для нормальной работы второго требовалось 7 В. Однако Arduino, подключённая к ПК, может обеспечить максимум 5 В. Кроме того, недостаточно и тока в 500 мА. Последующие подключения также привели к данным значениям. Вследствие этого возникла необходимость в дополнительном источнике питания.

Исходя из подобного опыта, можно заключить о необходимости следующего порядка проведения входного контроля сервоприводов:

- проверка комплектности и качества сопроводительной документации, удостоверяющей качество продукции (сертификата, паспорта, удостоверения о качестве и т. д.), с регистрацией в журнале верификации;
- проверка внешнего вида продукции, состояния поверхностей, упаковки, маркировки, наличия механических и прочих повреждений.

– измерения параметров сервоприводов, а именно: напряжения трогания и его отклонения от номинального значения, срабатывание при подаче команд управления, направление вращения при срабатывании, не требующие специально разрабатываемых стендов, что может быть учтено при реализации малых проектов в коммерческих целях, где не требуется контроля механического момента, развиваемого на валу сервопривода.

#### Библиографические ссылки

1. InMoov [Электронный ресурс]: открытый ресурс 3D моделей. Режим доступа: <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/> (дата обращения: 21.07.2022).
2. ГОСТ 16264.0–2018 Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия
3. ГОСТ 24297 2013 Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля
4. ГОСТ 27570.0–87 (МЭК 335-1–76) Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Общие требования и методы испытаний
5. Занимательная робототехника [Электронный ресурс]: научно-популярный портал. Режим доступа: <http://edurobots.ru/2014/04/arduino-servoprivod> (дата обращения: 15.08.2022).
6. RadioDetector [Электронный ресурс]: радиотехнический портал. Режим доступа: <https://www.radiodetector.ru/podkljuchenie-servoprivoda-k-arduino/> (дата обращения: 23.07.2022).

#### References

1. InMoov [electronic resource]: otkrytyj resurs 3D modelej. Available at: <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/> (date of application: 21.07.2022).
2. GOST 16264.0–2018 Mashiny elektricheskie maloj moshchnosti. Dvigateli. Obshchie tekhnicheskie usloviya
3. GOST 24297 2013 Verifikaciya zakuplennoj produkcii. Organizaciya provedeniya i metody kontrolya
4. GOST 27570.0–87 (MEK 335-1–76) Bezopasnost' bytovyh i analogichnyh elektricheskikh priborov. Obshchie trebovaniya i metody ispytanij
5. Zanimatel'naya robototekhnika [electronic resource]: nauchno-populyarnyj portal. Available at: <http://edurobots.ru/2014/04/arduino-servoprivod> (date of application: 15.08.2022).
6. RadioDetector [electronic resource]: radiotekhnicheskij portal. Available at: <https://www.radiodetector.ru/podkljuchenie-servoprivoda-k-arduino/> (date of application: 23.07.2022).

© Феоктистов Д. А., Орешенко Т. Г., Баранова Е. Г., Федоров М. С., Широков А. Д., 2022

УДК 629.78.018

## МОДЕЛЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. Н. Цивилев\*, Е. А. Шангина

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: tsivilev@iss-reshetnev.ru

*Описывается подход к моделированию рискованной ситуации в процессе электротермовакuumных испытаний космического аппарата для парирования негативного влияния на объект испытаний.*

*Ключевые слова: имитационная модель, термовакuumные испытания, риск.*

## THE MODEL OF RISK MANAGEMENT DURING THERMAL VACUUM TESTS AT SPACECRAFT LEVEL

I. N. Tsivilev\*, E. A. Shangina

Joint-Stock Company “Academician M.F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: tsivilev@iss-reshetnev.ru

*The article describes an approach to modeling a risk situation in the process of thermal vacuum testing of a spacecraft in order to mitigate the negative impact on the test object.*

*Keywords: simulation model, thermal vacuum tests, risk.*

Процесс проектирования космических аппаратов (КА) в общем виде можно представить как разработку множества уникальных его моделей, способных быть воплощенными на стадиях жизненного цикла КА.

Модель – есть сущность, воспроизводящее явление, объект или свойство объекта реального мира [1].

Стадия жизненного цикла КА – часть жизненного цикла продукции, характеризующаяся совокупностью выполняемых работ и их конечными результатами [2].

Проектирование КА не ограничивается созданием облика будущей сложной технической системы, оно также алгоритмизирует различные виды конструкторских, технологических и производственных процессов с целью изготовления продукции определенного качества.

Не секрет, что любой сколь угодно детерминированный процесс имеет некоторую долю стохастичности, поэтому и возможны риски, оказывающие влияние на жизненный цикл КА.

В широком смысле под понятием *риск* понимается – оценка ситуации принятия решений, имеющей неопределённость исхода, при обязательном наличии неблагоприятных последствий.

Одной из основных задач проектирования любой технической системы, в том числе и КА, является следование тенденции к сокращению до минимума количества ситуаций в системе с неопределённым исходом, применяя подходы управления рисками.

Управление рисками – это разновидность управления, обеспечивающая постоянный мониторинг внешней и внутренней среды, количественную и качественную оценку рисков, уменьшение неопределённости при принятии решений, разработку и реализацию мер по сокращению риска и минимизации возможных финансовых и прочих потерь [3].

Базовыми действиями управления рисками для жизненного цикла технической системы являются:

- анализ рискованной ситуации;
- определение доступных путей и средств минимизации риска [4].

Анализ рискованной ситуации проводится основываясь на применении статистического, аналитического и экспертного подходов. Статистический и аналитический подходы позволяют количественно

оценить риски. Одним из методов количественного анализа риска является имитационное моделирование.

Определение путей для минимизации риска происходит по результатам моделирования рисков ситуации и внесения корректировок входных данных модели.

В качестве объекта для исследования рисков ситуации подлежит рассмотрению процесс обеспечения ресурсами термобарокамеры при электротермовакuumных испытаниях КА. Одним из критически необходимых материальных ресурсов для проведения испытаний в термобарокамере является сжиженный азот. Сжиженный азот используется в качестве средства охлаждения (хладогента) криоэкранов термобарокамеры до температуры его кипения при атмосферном давлении, что способствует имитации условий нахождения КА в космическом пространстве в процессе проведения наземных испытаний.

Особенность процесса обеспечения сжиженным азотом (ресурсом) потребителя (электротермовакuumных испытаний) характеризуется неравномерностью потребления ресурса, вызванной режимами проведения испытаний КА, ограниченностью объёма буферных ёмкостей, лояльностью в расписании поставок. Также наличествует тот факт, что хранение ресурса (сжиженного азота) для испытаний впрямую не может быть реализовано эффективно в силу особенностей низкотемпературных жидкостей быть подверженными испарению из-за притока теплоты извне. Очевидно, что планирование поставок сжиженного азота для нужд предприятия простым составлением графика поставок, исходя из ретроспективы его расхода, способствует накоплению риска его дефицита в процессе испытаний КА. Это может дестабилизировать процесс испытаний, приводить к поломкам оборудования и срывом сроков изготовления КА.

Риск дефицита ресурса, вызванный неопределённостями в поставках, хранении и потреблении ресурса может быть снижен, применяя имитационное моделирование к процессу поставок ресурса путём оптимизации.

Имитационная модель процесса поставок ресурса (сжиженного азота) для испытаний КА, опирающаяся на теорию очередей, построенная по принципам системы массового обслуживания и представленной в виде транзактов, накопителей и каналов обслуживания, позволяет провести оптимизацию условий организации работы системы [5].

Разработка имитационной модели системы обеспечения ресурсом (сжиженным азотом) электротермовакuumных испытаний КА позволяет использовать результаты моделирования для гибкой настройки графика поставок ресурса, позволяя снизить риск дефицита ресурса.

### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 57188–2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. Введ. 2017-05-01. М. : Стандартинформ, 2016. 12 с.
2. ГОСТ Р 15.000–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. Введ. 2017-07-01. М. Стандартинформ, 2016. 19 с.
3. Д.Б. Юдин. Математические методы управления в условиях неполной информации. М.: Сов. радио, 1974. 400 с.
4. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. Введ. 2003-09-01. М. Издательство стандартов, 2002. 28 с.
5. А.Я. Хинчин; ред. Б.В. Гнеденко. Работы по математической теории массового обслуживания. М.: Физматгиз, 1963. 236 с.

### References

1. *GOST R 57188–2016. Chislennoe modelirovaniye fizicheskikh protsessov. Termini i opredeleniya.* [Numerical modeling of physical processes. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 12 p.
2. *GOST R 15.000–2016. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Osnovnie polozheniya.* [System of product development and launching into manufacture. Basic provisions] Moscow, Standartinform Publ., 2017. 19 p.
3. *D.B. Udin. Matematicheskie metody upravleniya v usloviyah nepolnoy informatsii* [Mathematical methods of control in conditions of incomplete information]. Moscow, Sov.Radio Publ., 1974. 400 p.
4. *GOST R 51901–2002. Upravlenie nadezhnostiy. Analiz riska tehnologicheskikh sistem* [Dependability management. Risk analysis of technological systems]. Moscow. Standard Publ., 2002. 28 с.
5. *A.Ya. Hinchin; red. B.V. Gnedenko. Raboty po matematicheskoy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Works on the mathematical theory of queuing]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 236 p.

УДК 629.78; 621.32

## РАЗРАБОТКА СВЕТОДИОДНОЙ СБОРКИ ИМИТАТОРА ВНЕАТМОСФЕРНОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. Шевчук<sup>1,2\*</sup>, В. В. Двирный<sup>1,2</sup>, М. С. Майбах<sup>3</sup>, С. А. Санько<sup>3</sup>, А. А. Павлова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»  
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>АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»  
Российская Федерация, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а

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

*Рассмотрены требования к светодиодным источникам имитатора внеатмосферного солнечного излучения. Наилучшее соответствие требуемым характеристикам возможно с применением специализированных светодиодов. Проанализированы световые характеристики разработанной светодиодной сборки и пути их дальнейшего повышения.*

*Ключевые слова: термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод, светодиодная сборка, спектральное соответствие.*

## DESIGNING OF THE LED ASSEMBLY FOR OUT-ATMOSPHERIC SOLAR SIMULATOR

A. A. Shevchuk<sup>1,2</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1,2</sup>, M. S. Maybakh<sup>3</sup>, S. A. San'ko<sup>3</sup>, A. A. Pavlova<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>Joint-Stock Company “Research Institute of Semiconductor Devices”

99a, Krasnoarmeyskaya Str, Tomsk, 634034, Russian Federation

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

*We considered the requirements for LED sources of the AM0 solar simulator. The best compliance with the required characteristics is possible with the use of specialized LEDs. We analyzed the luminous characteristics of the developed LED assembly and ways to improve them.*

*Keywords: thermal vacuum tests, solar simulator, light emitting diode, LED assembly, spectral match.*

В предыдущих работах [1, 2] показано, что основным препятствием к повышению световых и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения (ИСИ) для термовакуумных испытаний (ТВИ) космических аппаратов (КА) является размещение светового источника за пределами термовакуумной камеры. В свою очередь, это обусловлено особенностями практически безальтернативно применяемых в световом источнике таких ИСИ газоразрядных ксеноновых ламп.

Появление в последнее десятилетие новых разработок высокоэффективных светодиодов делает возможным создание простого и эффективного светового источника ИСИ, адаптированного к работе в термовакуумной камере [3]. Результаты измерений световых характеристик современных светодиодных сборок высокой мощности в преимущественно видимой области, галогенных ламп в преимущественно инфракрасной области солнечного спектра и последующего математического моделирования комбинированного светового источника в среде Zemax [2, 3] подтверждают его соответствие предъявляемым к ИСИ для ТВИ КА требованиям [4]. Следующим логическим шагом становится создание действующей модели с подтверждением ее световых характеристик в условиях ТВИ.

В результате моделирования к светодиодным сборкам ИСИ определены следующие требования:

- высокая световая мощность при потребляемой электрической мощности порядка 20 Вт;
- спектр, состоящий из излучения светодиодов разных длин волн, близкий к внеатмосферному спектру Солнца в видимой области и частично – в инфракрасной области;
- малый, приближающийся к точечному, размер излучающей поверхности, позволяющий установить на сборку единый оптический элемент.

Из-за отсутствия отечественных аналогов для измерений и моделирования использовались светодиодные сборки LED ENGIN LZ7 зарубежного производителя OSRAM [5], состоящие из компактно размещенных на площадке 5x5 мм семи кристаллов светодиодов шести длин волн. Номинальная потребляемая мощность сборки 18 Вт, максимальная – до 50 Вт.

Поскольку приобретение элементной базы зарубежного производства сегодня связано со значительными трудностями, одной из главных задач при создании светодиодного ИСИ для ТВИ КА становится разработка не уступающих по характеристикам отечественных светодиодных сборок.

Разработанная авторами сборка состоит из семи кристаллов светодиодов шести длин волн. Внешний вид показан на рис. 1. Измеренные результирующие спектры разработанной сборки (образец 1), сборки LED ENGIN LZ7 (образец 2) и внеатмосферный солнечный спектр при равной энергетической освещенности в диапазоне 400 – 900 нм показаны на рис. 2. Для получения одинакового прямого тока светодиоды сборок соединены последовательно.

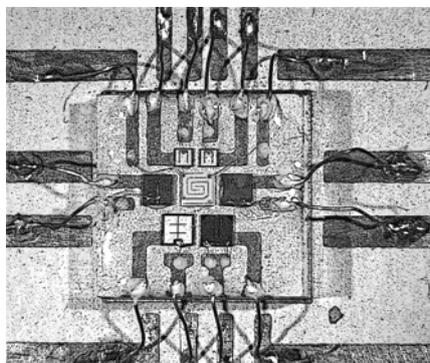


Рис. 1. Образец 1

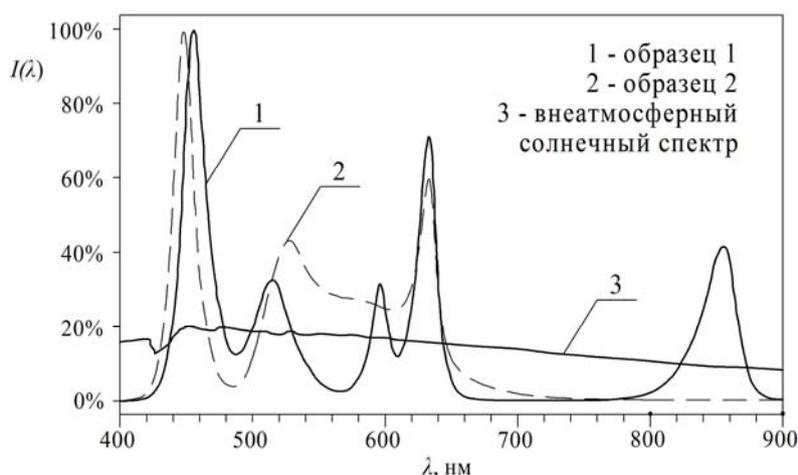


Рис. 2. Спектры образцов 1 и 2

Спектр разработанной сборки доходит до 850 нм, что облегчает ее согласование с галогенными лампами накаливания. В то же время спектр сборки LED ENGIN LZ7 отличается большей равномерностью, что объясняется меньшим шагом между длинами волн отдельных светодиодов, а более широкая спектральная полоса излучения некоторых из них – дополнительным слоем люминофора. Общим недостатком обоих образцов является избыточное излучение в областях 450 и 630 нм и, на-

оборот, его недостаток в области длин волн более 650 нм. Это требует отдельного регулирования мощности светодиодов сборок многоканальной системой управления.

Таким образом, на следующем этапе наиболее целесообразна разработка специализированной светодиодной сборки с более высокими эффективностью и спектральным соответствием. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- увеличить число светодиодов различных длин волн с возможным расширением спектральной полосы части светодиодов сборки за счет дополнительного слоя люминофора;
- оптимизировать результирующий спектр сборки без отдельного управления светодиодами различных длин волн путем подбора их количества и световой мощности.

### 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. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В. Пути повышения технических и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (10–13 нояб. 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. Ч. 1. С. 268–270.
3. 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.
4. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / Кравченко С. В., Нестеров С. Б., Романько В. А., Тестоедов Н. А., Халиманович В. И., Христич В. В. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.
5. Сайт производителя OSRAM. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (дата обращения: 09.09.2022).

### References

1. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy 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. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Pastushenko O. V. [Ways to improve the technical and operational characteristics of solar simulators for ground testing of spacecraft]. *Reshetnevskiy chteniya : materialy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. 14th Int. scient. and pract. conf. “Reshetnev readings”]. Krasnoyarsk, 2020, vol. 1, p. 268–270 (In Russ).
3. 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).
4. Kravchenko S. V., Nesterov S. B., Roman'ko V. A., Testoyedov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. *Podkhody k sozdaniyu kompleksnykh sistem dlya otrabotki i ispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Approaches to creating integrated systems for optimization and testing of spacecraft]. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, no 1 (13), p. 149–175 (In Russ.).
5. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. OSRAM, 2021. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (accessed: 09.09.2022).

© Шевчук А. А., Двирный В. В., Майбах М. С., Санько С. А., Павлова А. А., 2022



**Секция**

**«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
И УПРАВЛЕНИЕ»**

УДК 629.783

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МКА CUBESAT. ФАЗА А

С. С. Белехов, О. Е. Агафонова, М. Е. Попов, В. Х. Ханов, Е. М. Дорогайкина

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

*В данной работе предложен проект космической миссии на базе МКА CubeSat с целью обеспечения жителей северных широт технологиями Интернета Вещей. Вместе с тем, с целью уменьшения времени передачи данных при наименьшем возможном количестве КА для эффективной работы систем связи, мы использовали методы межспутникового взаимодействия посредством технологии LoRa.*

*Ключевые слова: Интернет Вещей, IoT, LoRa, CubeSat.*

## DESIGN OF THE SMALL SPACECRAFT “CUBESAT”. PHASE A

S. S. Belehov, O. E. Agafonova, M. E. Popov, V. K. Khanov, E. M. Dorogaykina

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

*In this article we suggested the project of a space mission on the basis of the small spacecraft CubeSat with a purpose of providing the Northern latitudes of our country with the technologies of Internet of Things. Also, in order to reduce total amount of time spent on data transmissions with the smallest possible number of spacecraft given, we used methods of inter-satellite interaction through LoRa technology.*

*Ключевые слова на английском языке: Internet of Things, IoT, LoRa, CubeSat.*

As it known, the lack in communication in the northern latitudes of Russia is one of the most impactful factors dedicated to the technical development of the regions. Permafrost does not allow laying cables for the Ethernet network, and cellular communication is available only in some cities. Besides, northern zones are not included in the coverage area of geostationary satellites. In this regard, it appears to us that the usage of the modern technologies, in particular the Internet of Things (IoT), in these zones is hard to maintain properly.

To highlight the potential benefits from using the technology, we suggest its further implementation into the following areas:

- partial or complete automisation of managing groups of devices (by exchanging information between them);
- emergency communication or residents and tourists of northern latitudes;
- delivery of urgent data from weather stations;
- tracking the location of rare animals.

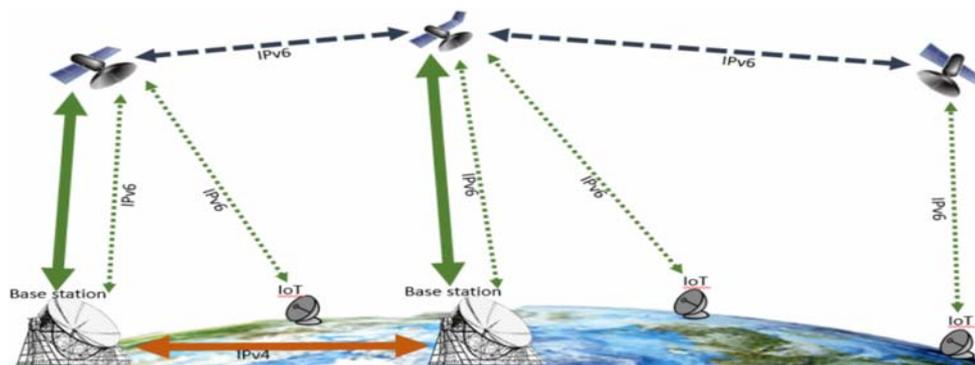
Thereby, the solution to the stated problem is relevant to the present stage of development of the northern areas and is of paramount importance due to the potentially vast implementation scope of spheres mentioned above. The solution to that issue is to use a group of small spacecrafts (SSC), which coverage areas will include the northern latitudes of Russia so that we will potentially provide citizens of the aforementioned areas with the every-day-use technologies and opportunities.

With the goal of building a network, we have decided to use the 6LOWPAN standard (IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks). 6LOWPAN is an IPv6 communication standard on top of low-

power wireless personal networks of the IEEE 802.15.4 standard. The low-power IEEE 802.15.4 layer is replaced by more powerful and providing better communication quality technology LoRa [1].

LoRa (Long Range) is a low-power data transmission network modulation technology in an unlicensed frequency range, which is used for data transmission in autonomous IoT sensors. This technology is based on the methods of modulation with an extended spectrum. LoRa provides long-distance transmission with low power consumption. The technology covers the physical layer, while other technologies and protocols such as LoRaWAN cover the upper layers. In that way, the use of this solution solves the problems of spacecraft communication and transmission of useful information between the end nodes of the network [2].

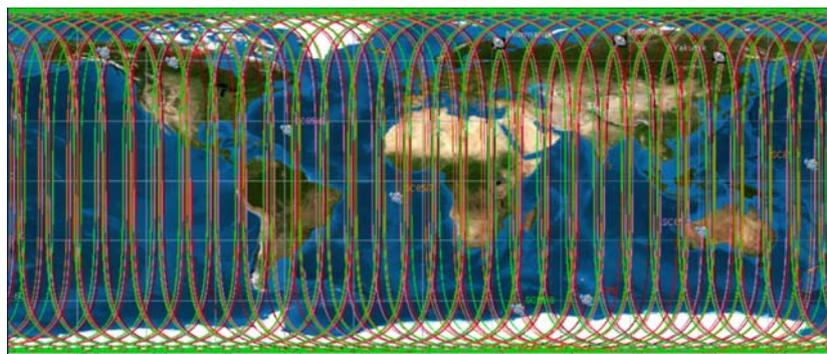
In order to reduce the time for the delivery of data packets and increase network availability through channel redundancy (intermediary ground stations), it was decided to use an inter-satellite communication system with IPv6 addressing and IPv4 (between ground base stations). As it appears, a single network will be created between the space and ground segment, as shown in Picture 1.



Pic. 1. Scheme of the communication network between the SSC's and the ground-segment stations

Taking into account the current capabilities (minimum potential costs), it is decided to use 8 SSC's in 4 orbits, which can maintain communication with 3 base stations located in the cities of Murmansk, Dudinka and Yakutsk.

The projection of the spacecraft movement on the Earth's surface with the location of the base stations and 3D model of the SSC's orbits trajectories shown in Picture 2 and 3 respectively.



Pic. 2. Projection of the orbital trajectories to the Earth's surface and schematic location of the ground segment stations

It is highly likely that in the future this project can have a vast potential to scale up by increasing the number of base stations and spacecraft. Then it can be possible to achieve less transmitting delays and to increase the efficiency of inter-satellite interactions.

The basis of our SSC design is the OrbiCraft-Pro 3U satellite platform modification "Flight" SXC3-GA with all the components and systems necessary for operation from Sputnix, including the OrbiCraft Pro SXC-UHF-02 VHF transceiver (for the telemetry channel and telecommands) [3]. As for the payload, the LoRaWAN radio module as well as a memory card for temporary data storage will be fitted on board.

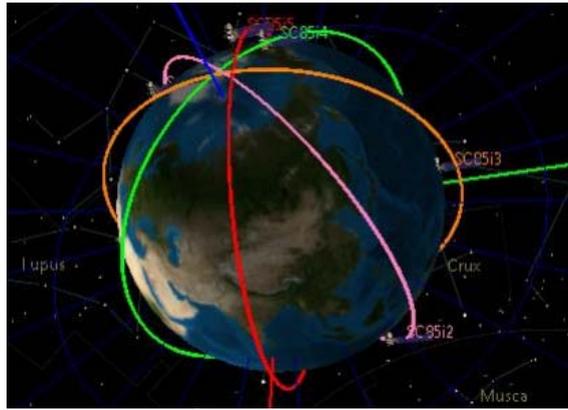


Рис. 3. 3D orbital trajectories model

As a result, the achievement of two main goals of space mission is likely in the future with its successful implementation. Firstly, the project can provide citizens of the northers latitudes of our country with the IoT technologies which allow to perform a vast spectre of tasks, such as maintaining vital emergency communication lines in the conditions of the absence of other communicative options (which may safe hundreds of lives). Secondly comes the test for the way of intersatellite interactions (by LoRa radio module), thus founding a basis for the future space missions using relevant technologies.

#### Библиографические ссылки

1. RFC 4944: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4944> (дата обращения: 26.08.2022).
2. TeleMetric: LoRaWAN Архитектура [Электронный ресурс]. URL: <https://telemetric.tech/lorawan-технология-и-спецификации/> (дата обращения: 27.08.2022).
3. Спутникс: Спутниковая платформа ОрбиКрафт-Про 3U модификация "Лётная" [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/cubesat-platformy/orbikraft-pro-3u-letnaya> (дата обращения: 24.08.2022).

#### References

1. RFC 4944: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4. Available at: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4944> (accessed: 26.08.2022).
2. TeleMetric: LoRaWAN Architecture. Available at: <https://telemetric.tech/lorawan-технология-и-спецификации/> (accessed: 27.08.2022).
3. Sputnix: OrbiCraft-Pro 3U satellite platform modification "Flight". Available at: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/cubesat-platformy/orbikraft-pro-3u-letnaya> (accessed: 24.08.2022).

© Belehov S. S., Agafonova O. E., Popov M. E.,  
Khanov V. K., Dorogaykina E. M., 2022

УДК 629.783

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПУТНИКА CUBESAT ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ

С. В. Белов, А. В. Бельков, 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

*Рассматривается влияние плотности размещения электронных плат в корпусе космического аппарата типа CubeSat на распределение температуры в элементах его конструкции.*

*Ключевые слова: CubeSat, космический аппарат, тепловое состояние, теплопроводность, электронная плата, солнечная батарея.*

## CUBESAT THERMAL STATE UNDER DIFFERENT ELECTRONIC CIRCUIT BOARD PACKAGING

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

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 effect of electronic circuit board packaging density within CubeSat-type spacecraft frame structure on temperature distribution in its structure elements is considered.*

*Keywords: CubeSat, spacecraft, thermal state, thermal conductivity, printed circuit board, solar cell panel.*

CubeSat – стандарт малых космических аппаратов (КА), разработанный в 1999 году Калифорнийским политехническим и Стэнфордским университетами [1]. Изначально спутники CubeSat предназначались для учебных задач – обучение студентов в процессе создание реального КА и работы с ним во время космического полета. Применение данного стандарта позволило снизить стоимость проектирования, изготовления и вывода на орбиту КА. Стандарт регламентирует геометрию корпусов спутников типа CubeSat на основе базового модуля кубической формы (размеры 100×100×100 мм). КА с таким корпусом должен иметь массу и стоимость не более 1,33 кг и 1000 \$, соответственно [2]. При масштабировании базового модуля может быть получен корпус с объемом, достаточным для обеспечения требуемой функциональности КА. Радиоэлектронное содержание модуля CubeSat включает обычные промышленные компоненты, причем электроника космического исполнения не используется [3].

Базовый модуль CubeSat (рис. 1) имеет объем корпуса около 1 дм<sup>3</sup>. Модуль включает рельсы (1) сечением 8,5×8,5 мм, которые вместе соединительными элементами (2) образуют силовой каркас. Длина рельсов равна 113,5 мм, они выступают за границы корпуса на 0,5-7,0 мм. Платы (4) соединены с корпусом элементами крепления (3). Стенки корпуса (5) крепятся к силовому каркасу, на них размещаются панели солнечных батарей.

Важнейшей проблемой для таких КА является обеспечение теплового режима электронных компонент. Малые размеры корпуса спутника не позволяют размещать в нем активные системы терморегулирования. Поэтому тепловой баланс на заданном температурном уровне поддерживается: пассивными методами терморегулирования (подбор характеристик отражения и поглощения поверх-

ностей корпуса КА) [4]; режимом работы электронного оборудования; подогревом аккумуляторных батарей [5].

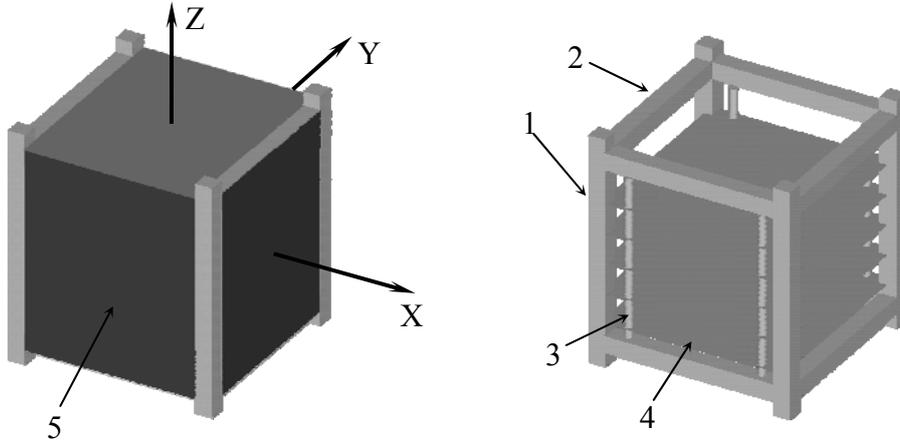


Рис. 1. Схема базового модуля CubeSat:

1 – рельс; 2 – соединительный элемент каркаса; 3 – элемент крепления плат;  
4 – плата с электронными компонентами; 5 – стенка корпуса

Размеры корпуса КА определяют площадь панелей солнечных батарей, размещенных на его внешних поверхностях. Они представляют весьма ограниченный источник электрической энергии. Полученная электроэнергия используется для питания радиоэлектронных устройств КА, вызывая нагрев плат, а также накапливается в аккумуляторной батарее. Поэтому распределение температуры по элементам конструкции КА будет определяться не только падающим излучением от внешних источников, но и тепловыделением внутри корпуса КА. В соответствии со стандартом PC/104 расстояние между платами устанавливается равным 15 мм [6], в то же время в предложениях по созданию российского аналога стандарта CubeSat данный параметр уменьшен до 6 мм [7].

Представляет интерес оценка влияния плотности размещения плат с тепловыделяющими электронными компонентами на тепловое состояние CubeSat КА. Для этого рассматривается CubeSat КА (рис. 1), занимающий объем  $V$  и имеющий внешние  $S_{out}$  и внутренние  $S_{in}$  свободные поверхности, движется по круговой орбите в плоскости земного экватора на высоте 300 км. Ось  $Y$  системы координат КА направлена к центру Земли. Тепловое состояние КА в момент времени  $t$  описывается нестационарным уравнением теплопроводности с начальными и граничными условиями

$$c\rho T_t = k\Delta T + q,$$

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

$$k \cdot T_n = \alpha Q_{rad(out)} - \varepsilon\sigma_0(T^4 - T_\infty^4), (x, y, z) \in S_{out},$$

$$k \cdot T_n = \alpha Q_{rad(in)} - \varepsilon\sigma_0(T^4), (x, y, z) \in S_{in},$$

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;  $q=q(x,y,z)$  – плотность внутренних тепловых источников;  $\varepsilon=\varepsilon(x,y,z)$  и  $\alpha=\alpha(x,y,z)$  – коэффициенты излучения и поглощения;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $Q_{rad(out)}$  и  $Q_{rad(in)}$  – плотности потоков радиационной энергии к свободным поверхностям от внешних и внутренних источников. Задача решается численно с использованием программного пакета NX. Рассмотрены три расчетных случая: редкое расположение плат, внутренние тепловые источники не работают; редкое расположение плат, внутренние тепловые источники включены; плотное расположение плат, внутренние тепловые источники включены.

Полученные результаты показывают влияние плотности расположения плат на распределение температуры по элементам конструкции КА.

### Библиографические ссылки

1. CubeSat Design Specification Review 14.1. *The CubeSat Program*. Cal Poly SLO, 2022. 34 p. URL: [https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14\\_1+2022-02-09.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf) (дата обращения: 07.09.2022)
2. Saeed N., Elzanaty A., Almorad H., [et. al.] *CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, No. 3, P. 1839–1862
3. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты в дистанционном зондировании Земли // *Исследования Земли из космоса*. 2019. № 5. С. 82–88.
4. Reyesa L. A., Cabriales-Gómez R., Chávez C. E., [et. al.] Thermal modeling of CIIASat nanosatellite: A tool for thermal barrier coating selection // *Applied Thermal Engineering*. 2020. No 166. 114651
5. Наноспутниковая платформа CubeSat «OrbiCraft-Pro». Москва, 2019. URL: [https://sputnix.ru/tpl/docs/Описание%20ОрбиКрафт-Про%20\(рус.\).pdf](https://sputnix.ru/tpl/docs/Описание%20ОрбиКрафт-Про%20(рус.).pdf) (дата обращения: 07.09.2022)
6. PC/104-Pluse Specification v. 2.0. 2003. 28 p. URL: <https://resources.winsystems.com/specs/PC104PlusSpec.pdf> (дата обращения: 07.09.2022)
7. Чмырев В. М., Нестеров Б. Ф. Возможности и компетенции по созданию российской группировки наноспутников стандарта CubeSat // АО «Технологии ГЕОСКАН». 2018 URL: [http://spaceresearch.ssau.ru/sites/all/themes/venture\\_theme/Concor/7.pdf](http://spaceresearch.ssau.ru/sites/all/themes/venture_theme/Concor/7.pdf) (дата обращения: 07.09.2022)

### References

1. CubeSat Design Specification Review 14.1. *The CubeSat Program*. Cal Poly SLO, 2022. 34 p. Available at: [https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14\\_1+2022-02-09.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf) (accessed 07.09.2022).
2. Saeed N., Elzanaty A., Almorad H., Dahrouj H., Al-Naffouri T. Y., Alouini, M. S. *CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, Vol. 22, No. 3, P. 1839–1862.
3. Gansvind I. N. [Small Satellites in Remote Sensing of the Earth] *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2019, No 5, P. 82–88. (In Russ.)
4. Reyesa L. A., Cabriales-Gómez R., Chávez C. E., Bermúdez-Reyes B., López-Botello O., Zambrano-Robledo P. Thermal modeling of CIIASat nanosatellite: A tool for thermal barrier coating selection. *Applied Thermal Engineering*, 2020 No 166, 114651
5. [Nanosatellite platform CubeSat «OrbiCraft-Pro»] (In Russ.) Available at: [https://sputnix.ru/tpl/docs/Описание%20ОрбиКрафт-Про%20\(рус.\).pdf](https://sputnix.ru/tpl/docs/Описание%20ОрбиКрафт-Про%20(рус.).pdf) (accessed 07.09.2022)
6. PC/104-Pluse Specification v. 2.0. Available at: <https://resources.winsystems.com/specs/PC104PlusSpec.pdf> (accessed 07.09.2022)
7. Chmyrev V. M., Nesterov B. F. [Capabilities and competencies for create the Russian nanosatellites grouping by the CubeSat standard] *АО «Tekhnologii GEOSKAN»*, 2018 Available at: [http://spaceresearch.ssau.ru/sites/all/themes/venture\\_theme/Concor/7.pdf](http://spaceresearch.ssau.ru/sites/all/themes/venture_theme/Concor/7.pdf) (accessed (07.09.2022))

УДК 629.783

## ОРГАНИЗАЦИЯ ЛЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА RESHUCUBE-1

Д. М. Зуев\*, В. Х. Ханов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru

*Работа описывает планируемые подходы к организации подготовки и проведения летной экспериментальной программы космического аппарата ReshUCube-1 в области физических и технологических экспериментов. Приведены планируемые тематики экспериментальных исследований.*

*Ключевые слова: ReshUCube-1, cubesat, космический эксперимент, технологическая демонстрация, космическое пространство.*

## ORGANIZATION OF FLIGHT EXPERIMENTS ON-BOARD OF RESHUCUBE-1 SATELLITE

D. M. Zuev\*, V. Kh. Khanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru

*The paper describes supposed approaches to organize preparations and conducting the flight experimental program of ReshUCube-1 satellite in physical and technological research fields. This work also includes planned topics of experiments.*

*Keywords: ReshUCube-1, cubesat, space experiment, technological demonstration, space environment.*

Наноспутник ReshuCube-1 [1], принадлежащий СибГУ им. М.Ф. Решетнева, был запущен 09.08.2022 попутным грузом при запуске КА «Хайям» (Иран) в числе других 16 наноспутников класса CubeSat ракетой Союз 2.16 [2].

ReshUCube-1 это космический аппарат формата CubeSat 3U, разработанный Сибирским государственным университетом науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (СибГУ) в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) Фонда Содействия Инновациям [3].

Основная цель ReshUCube-1 – вовлечение школьников и студентов в космическую и научно-исследовательскую деятельность. В качестве дополнительных целей: проведение экспериментов с перспективными образцами отечественных космических процессоров и программно-логических интегральных схем, летное тестирование разработанных радиационно-защитных экранов.

Космический аппарат выполнен в формате CubeSat 3U (340.5x100x100 мм, 3.41 кг) на базе спутниковой платформы производства ООО «СПУТНИКС» [4], полезная нагрузка «Реконфигурируемая космическая лаборатория» разработана и изготовлена в СибГУ. Облик аппарата представлен на рисунке.

Суть полезной нагрузки «Реконфигурируемая космическая лаборатория» заключается в том, что полезная нагрузка имеет набор экспериментального оборудования (датчиков, детекторов, систем), режимы работы которых можно программно менять в процессе полета. Т.е. пользователь полезной нагрузки на базе имеющегося оборудования может придумать эксперимент, затем отработать его на наземном инженерном образце полезной нагрузки, написать программное обеспечение и загрузить его на борт для выполнения эксперимента [5].

Для облегчения работы пользователя для написания процедур эксперимента используется скриптовый язык, в который имплементирован набор команд для работы с каждым элементом оборудования полезной нагрузки. Соответственно, на борту находится интерпретатор данных скриптов для выполнения полетных процедур экспериментов.



Космический аппарат ReshUCube-1

Оборудование полезной нагрузки «Реконфигурируемая космическая лаборатория позволит»:

- изучение магнитосферы и радиационной обстановки на орбите;
- изучение влияния атмосферы на орбиту космического аппарата;
- мониторинга земной поверхности камерой оптического диапазона;
- изучение температурных режимов спутника;
- изучение влияние космических условий на электронные компоненты;
- изучение работы отечественных процессоров космического назначения.

На данный момент стоит задача поэтапного введения спутника в эксплуатацию, после чего наступит период использования спутника для проведения различного рода физических и технологических экспериментов. На данный момент параллельно идут два процесса: поэтапного введения спутника в эксплуатацию с освоением устройств служебной платформы и подготовка набора физических и технологических экспериментов.

Подготовка и выполнение эксперимента включает в себя следующую последовательность действий:

- Постановка гипотезы, целей и задач эксперимента
- Подготовка литературного обзора по изучаемым физическим процессам
- Разработка методологии эксперимента
- подготовка полетной процедуры
- Подготовка программного обеспечения
- Наземная отработка эксперимента на инженерном образце полезной нагрузки
- Загрузка программного обеспечения на борт
- Выполнение эксперимента
- Получение данных
- Обработка получаемых данных

Стоит отметить, что для проведения некоторых экспериментов и привлечения школьников и студентов в процесс стоит задача разработки программного обеспечения для обработки и визуализации данных.

Планируется подготовить и отработать на борту базовый набор физических и технологических экспериментов, подготовить набор учебно-методических пособий по вышеперечисленным направлениям экспериментов с целью методического обеспечения включения студентов и школьников

в проведение космических экспериментов, анализа получаемых данных, разработки своих экспериментов.

После перехода в полнофункциональный режим полезной нагрузки (реконфигурируемый) с применением скриптового языка полетной процедуры эксперимента, планируется реализовать механизм конкурсного отбора студенческих и школьных заявок на проведение эксперимента.

Для проведения большого количества экспериментов будут составляться полетные расписания на неделю с временными окнами для того или иного эксперимента (в зависимости от временных рамок, регионов космоса, солнечных событий и т. д.). Схожие мониторинговые эксперименты могут выполняться одновременно, а также параллельно с другими экспериментами.

В работе был описан подход к организации летных экспериментов на борту ReshUCube-1.

### Библиографические ссылки

1. ReshUCube-1 [Электронный ресурс]. URL: <https://reshucube.ru> (дата обращения: 05.09.2022).
2. Россия вывела на орбиту иранский спутник дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20220809/sputnik-1808239841.html> (дата обращения: 05.09.2022).
3. Научно-образовательный проект Space-π [Электронный ресурс]. URL: [https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi\\_август.pdf](https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi_август.pdf) (дата обращения: 05.09.2022).
4. Спутникс. Приборы CubeSat [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat> (дата обращения: 05.09.2022).
5. Ханов В.Х., Зуев Д.М., Шахматов А.В. Реализации полезной нагрузки наноспутника ReshUCube как реконфигурируемой космической лаборатории. В материалах РЧ-21, т.1, с.418-419.

### References

1. *ReshUCube-1* (In Russ.) Available at: <https://reshucube.ru> (accessed: 05.09.2022).
2. *Rossiya vyvela na orbitu iranskiy sputnik distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (In Russ.) Available at: <https://ria.ru/20220809/sputnik-1808239841.html> (accessed: 05.09.2022).
3. *Nauchno-obrazovatel'nyy proyekt Space-π* (In Russ.) Available at: [https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi\\_август.pdf](https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi_август.pdf) (accessed: 05.09.2022).
4. *Pribory CubeSat* [Sputniks] (In Russ.) Available at: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat> (accessed: 05.09.2022).
5. Khanov V.KH., Zuev D. M., Shakhmatov A.V. *Realizatsii poleznoy nagruzki nanosputnika ReshUCube kak rekonfiguriruyemoy kosmicheskoy laboratorii*. [Proc. of "Reshetnev Readings"], 2021, vol. 1, pp. 418-419.

© Зуев Д. М., Ханов В. Х., 2022

УДК 629.78

## РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКА ФОРМАТА CUBESAT

А. В. Кададова\*, Д. М. Кадочников, В. В. Уткин, В. О. Гончаров

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»

Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1

\*E-mail: akadadova@gmail.com

*В данной работе рассматривается процесс создание полезной нагрузки малого космического аппарата: спутника формата CubeSat CYCLOPS, созданного в БГТУ «ВОЕНМЕХ».*

*Ключевые слова: малые космические аппараты, полезная нагрузка, модуль, спутник.*

## CUBESAT NANOSATELLITE PAYLOAD DEVELOPMENT

A. V. Kadadova\*, D. M. Kadochnikov, V. V. Utkin, V.O. Goncharov

Baltic State Technical University named after D.F. Ustinov

1,1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

\*E-mail: akadadova@gmail.com

*This article discusses the process of creating a payload for a CYCLOPS small spacecraft, created at BSTU "VOENMEH".*

*Keywords: small spacecraft, payload, module, satellite.*

При создании полезной нагрузки (ПН) космических аппаратов (КА) важнейшей задачей является отработка технических решений. Сейчас идет активное развитие отрасли микроспутников формата CubeSat. Как правило, CubeSat имеет размер одного юнита (1U) 100×100×100 мм, грани которого покрыты солнечными панелями, а внутри расположена ПН [1]. Тестирование полезной нагрузки, путем проведения экспериментов в космическом пространстве в подобных спутниках позволяют использовать и тестировать элементную базу и технологии для более серьезных крупногабаритных космических аппаратов.

В рамках проекта «Space-т» в БГТУ «ВОЕНМЕХ» была сформирована команда студентов из Центра научно-технического творчества студентов (ЦНТТС) для создания ПН спутника [2].

Студенты ЦНТТС участвовали в разработке многостепенного исполнительного модуля и мехатронного модуля для отработки инженерных решений с использованием спутниковой платформы CubeSat «ОрбиКрафт-Про 3U» от компании «Спутник» [3].

Многостепенный исполнительный модуль предназначен для стабилизации и позиционирования оптического устройства. Структурно модуль представляет двухступенную платформу, обеспечивающую изменение углового положения выходного кинематического звена в пределах необходимых для ориентации бортовых приборов и устройств. В основе создаваемой платформы лежит ряд движителей, позволяющих обеспечить высокие показатели быстродействия и надежности данного модуля, особенно в условиях пониженных температур.

Мехатронный модуль предназначен для отработки технических решений по созданию универсальных исполнительных устройств, являющихся основой построения малогабаритных робототехнических комплексов на базе платформы CubeSat. Мехатронный модуль было решено приспособить для выдвижения какой-либо полезной нагрузки (например, передающей антенны). Модуль предназначен для линейного передвижения на расстояние не менее 50 мм. Для выдвижения рейки был поставлен сервопривод mg90s с углом поворота от 0 до 180 градусов. Для контролирования положения рейки в конструкцию мехатронного модуля была введена обратная связь – концевые датчики, разработанные в нашем вузе. Особенностью датчиков является возможность изменения расстояния срабатывания в

зависимости от установленного на плате датчика номинала сопротивления резистора. Конечный вид обоих ПН в сборке представлен на рис. 1.



Рис. 1. Мехатронный и многостепенной модули в сборке

Программа для управления мехатронным модулем писалась с помощью библиотеки "ESP32ServoSmooth.h" для платы полезной нагрузки с микроконтроллером ESP32-S. Микроконтроллер осуществляет подачу питания, управление сервоприводов и считывание состояний концевиков.

Для реализации команд, связанных с мехатронным модулем, были написаны 3 команды: задвижение рейки, выдвигание и цикл, состоящий из задвижения и выдвигания с задержкой между командами в 2 секунды. Команды реализовывались с проверкой текущего положения по датчикам, если рейка находится в половину выдвинутом состоянии, то перед выполнением некоторых из команд она задвинется в исходное положение. Это необходимо, чтоб избежать выпадения рейки из конструкции.

Прототип платы управления был изготовлен путем соединения проводами всех элементов на макетной плате, после проведения испытаний и подтверждения работоспособности всех модулей, был изготовлен окончательный вариант платы для интеграции в полезную нагрузку.

Данная плата работает совместно с подсистемой питания, благодаря которой можно переключать питание мехатронного модуля в следующих режимах: питание от бортовой сети, питание от аккумуляторов, питание от суперконденсаторов и зарядка аккумулятора или суперконденсатора, представлена на рис. 2. Такой функционал позволяет тестировать различные источники питания сервоприводов в процессе полета. Переключение режимов питания выполняется с помощью твердотельного реле.

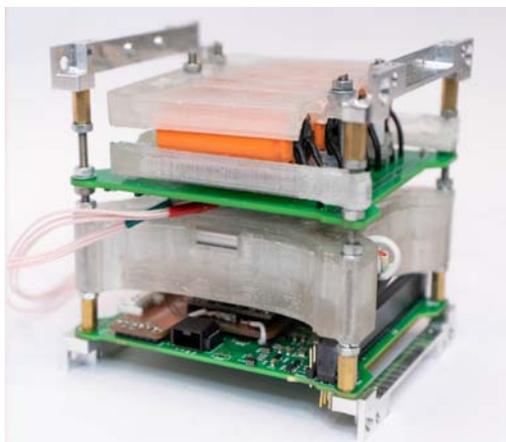


Рис. 2. Плата управления полезной нагрузки с подсистемой питания

Плата управления соединится с бортовой системой по интерфейсу USB. Бортовая система управления представляет собой микрокомпьютер Raspberry Pi 3b, к которому можно подключиться по радиоканалу с Земли, используя интерфейс telnet [4].

Для управления платой полезной нагрузки первоначально была разработана программа для операционной системой (ОС) Windows. Подобное решение было принято для возможности тестировать управление полезной нагрузкой через COM порт компьютера. В последствие программа была портирована на бортовой микрокомпьютер с ОС Linux, где успешно была отработана связь с платой управления полезной нагрузкой.

В итоге была разработана и протестирована система управления полезной нагрузкой с программным обеспечением для нее. Эта система была успешно интегрирована в существующий программно-аппаратный комплекс Орбикрафт Про, с учетом всех требований оператора запусков. Космический аппарат был успешно запущен 9 августа с космодрома Байконур [5]. Была установлена двухсторонняя связь со спутником. После завершения наладочных работ планируется провести тестирование ПН.

### Библиографические ссылки

1. Nanosats Database [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nanosats.eu> (дата обращения: 04.09.2022).
2. Проект Space-Pi [Электронный ресурс]. URL: <https://space-pi.ru/> (дата обращения: 04.09.2022).
3. Конструктор спутника «ОрбиКрафт» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.orbicraft.sputnix.ru/doku.php> (дата обращения: 04.09.2022).
4. Оборудование Raspberry Pi [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html> (дата обращения: 04.09.2022).
5. Военмеховский спутник в космосе [Электронный ресурс]. URL: <https://www.voenmeh.ru/news/science/sostoyalsya-zapusk-cubesat-sxc3-2110-rs29s> (дата обращения: 04.09.2022).

### References

1. Nanosats Database [Electronic resource]. URL: <https://www.nanosats.eu> (access: 04.09.2022).
2. Space-pi project [Electronic resource]. URL: <https://space-pi.ru/> (access: 04.09.2022).
3. OrbiCraft spacecraft kit [Electronic resource]. URL: <http://www.orbicraft.sputnix.ru/doku>. (access: 04.09.2022).
4. Raspberry Pi single board computer [Electronic resource]. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi>. (access: 02.09.2022).
5. Voenmeh's satellite in space [Electronic resource]. URL: <https://www.voenmeh.ru/news/science/sostoyalsya-zapusk-cubesat-sxc3-2110-rs29s>(access: 04.09.2022).

© Кададова А. В., Кадочников Д. М., Уткин В. В., Гончаров В. О., 2022

УДК 621.396.2

## СОЗДАНИЕ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В БГТУ «ВОЕНМЕХ» ИМ. Д.Ф. УСТИНОВА»

Д. М. Кадочников\*, В. В. Уткин, А. В. Кададова, В. О. Гончаров

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1  
\*E-mail: i49116@voenmeh.ru

*В статье рассмотрен вариант построения центра управления полетом малого космического аппарата. Предложена конструкция с использованием коммерчески доступных компонентов и показаны варианты конструкций таких комплексов.*

*Ключевые слова: система связи, цифровая связь, малые космические аппараты, cubesat.*

## COMPOSITION OF MISSION CONTROL CENTER FOR SMALL SPACECRAFT IN BSTU «VOENMEH»

D. M. Kadochnikov\*, V. V. Utkin, A.V. Kadadova, V.O. Goncharov

Baltic State Technical University named after D.F. Ustinov  
1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation  
\*E-mail:i49116@voenmeh.ru

*The article considers a variant of construction of mission control center for a small spacecraft. It proposes a design using commercially available components and shows options for the construction of such complexes.*

*Keywords: communication system, digital communication, small spacecraft, cubesat.*

В настоящее время, разработка малых космических аппаратов (МКА) в формате «CubeSat» набирает популярность среди учебных заведений [1].

Одной из задач при разработке МКА является создание центра управления полетом. Использование услуг ЦУП космических агентств является слишком дорогим, поэтому операторы малых КА создают свои ЦУП или обращаются в сторонние организации, например, СПУТНИКС, СКАНЭКС. С выводом на орбиту КА CYCLOPS 9 августа 2022 года в 8:54 МСК, разработанного в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, появилась задача обеспечения передачи команд и результатов экспериментов с борта аппарата [2]. Обычно, ввиду малых запасов энергии на борту, мощность передатчика ограничена сотнями милливатт – единицами ватт. Это создает большие трудности при приеме слабых сигналов, особенно в зашумленных радиоловительских диапазонах 144 и 435 МГц.

Комплекс аппаратуры ЦУП должен обеспечивать прием и передачу данных по радиоканалу, кодирование и декодирование информации, представление этой информации оператору и передачу управляющих команд от оператора на борт КА. Задачи кодирования и декодирования, управления опорноповоротным устройством и радиосредствами, а также обработки информации достаточно легко решается специализированным ПО [3].

Задача приема и передачи данных через радиоканал является более сложной ввиду необходимости передачи достаточно больших объемов данных при серьезно ограниченных возможностях использования радиоловительских диапазонов. Ограничения по полосе пропускания и видам излучения накладывают ограничения на использования широкополосных видов модуляции, поэтому чаще всего используется либо частотная манипуляция, либо гауссова минимальная манипуляция с полосой 25 кГц [4].

Выбор оборудования необходимо начать с определения задач ЦУП. В случае разработки аппарата, работающего с применением стандартных протоколов обмена, наилучшим приемопередатчиком, станет радиолюбительский трансивер, выполненный по классической супергетеродинной схеме. При применении однокристалльных радиотрансиверов целесообразно использование полосовых фильтров. Программно-определяемые радиосистемы незаменимы при работе с широкополосными видами модуляции и могут использоваться наравне с традиционными при построении ЦУП с ограниченным бюджетом.

Выбор готовых или изготовление собственных антенн начинается с расчета необходимого усиления и типа. Для диапазонов 145 и 435 МГц чаще всего применяются антенны типа Волновой канал или их модификации с элементами в виде рамок, а также спиральные антенны. Рассчитаем мощность на входах приемников наземной станции и космического аппарата, применяя основное уравнение радиосвязи. Примем мощность бортового передатчика 31 дБм, наземного 40 дБм. Минимально необходимый уровень сигнала для надежной связи на скорости 4800 бод составил –110 дБм. Расчет проводился для частоты 435 МГц и удаления до КА 1200 км.

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} + G_{\text{прд}} - L_{\text{прд}} - L_{\text{св}} - L_{\text{пр}} + G_{\text{прм}} - L_{\text{прм}}$$

$$P_{\text{прмз}} = 31 + 2,15 + 3 - 146 + 14 - 3 = -104 \text{ дБм}$$

$$P_{\text{прмб}} = 40 + 14 - 3 - 146 + 2,15 - 3 = -100 \text{ дБм,}$$

где  $G_{\text{прм}}$  – коэффициент усиления приемной антенны в дБи,  $G_{\text{прд}}$  – коэффициент усиления передающей антенны в дБи,  $L_{\text{св}}$  – “потери” на распространение в свободном пространстве в дБ,  $L_{\text{прд}}$  – “потери” в аппаратуре передачи в дБ,  $L_{\text{прм}}$  – “потери” в аппаратуре приема в дБ,  $P_{\text{прд}}$  – мощность передатчика в дБм,  $P_{\text{прмб}}$  – мощность на входе приемника КА в дБм.

$P_{\text{прмз}}$  – мощность на входе приемника ЦУП в дБм.

Расчетное усиление с запасом на потери и факторы, ухудшающие качество связи факторы, составило 14 дБи, что соответствует 12-14 элементному волновому каналу. Разница между экспериментальным и расчетным уровнем сигнала составила около 6 дБ, это обусловлено потерями в ионосфере и несовпадением плоскостей поляризации антенн вкуче с изменениями пространственного положения КА.

Рассмотрим состав аппаратуры ЦУП БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. В качестве приемопередатчика используется трансивер Icom IC-910H, он работает в диапазонах 145 и 435 МГц с мощностью до 50 Вт и имеет выход дискриминатора и вход модулятора для обеспечения работы цифровыми видами связи. Через согласующий интерфейс он подключается к ПЭВМ. Для целей слежения за КА используется опорно-поворотное устройство Yaesu G-5500DC с интерфейсом сопряжения с ЭВМ. Оно обеспечивает сопровождения низкоорбитального спутника в процессе его пролета над наземной станцией.

Антенное оборудование представлено 2 антеннами типа волновой канал на диапазоны 145 и 435 МГц. Они имеют выход 2 поляризации, что позволяет при помощи фазовращателя получить круговую поляризацию и улучшить энергетический бюджет радиолинии. На ЭВМ работает программный модем протокола AX.25 со скоростью 2400 бод, а также сервер шины CAN, позволяющий сделать ЦУП частью шины данных КА и специализированное ПО для удобного управления системами аппарата и создания telnet соединения между БЦВМ КА и ЭВМ ЦУП.

Неотъемлемой частью работы с КА является взаимодействие с ним через радиоканал. Практически возможные скорости обмена при типичном построении КА и нахождении антенного поста ЦУП в городских условиях находятся в диапазоне от 1200 до 4800 бод. Нельзя забывать о накладных расходах при передаче информации. При использовании для связи протокола AX.25 или FX.25 (с FEC) нецелевой расход полосы составляет до 33%. Это снижает эффективную пропускную способность и следует минимизировать их количество с учетом сохранения надежности радиолинии [5].

Таким образом был выполнен расчет энергетического бюджета радиолинии в обоих направлениях, подбор необходимых компонентов для построения ЦУП, сделан обзор текущего оборудования в ЦУП БГТУ «ВОЕНМЕХ», и даны рекомендации по размещению антенного поста. Схожим образом расчет может быть выполнен при иных параметрах орбиты КА и его подсистемы связи.

### Библиографические ссылки

1. Кададова А.В., Уткин В.В. Анализ ошибок спутников CubeSat. Перспективы стратосферных запусков // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. –М.: Издательство «Перо», 2021.С. 654-655
2. Военмеховский спутник в космосе [Электронный ресурс]. URL: <https://www.voenmeh.ru/news/science/sostoyalsya-zapusk-cubesat-sxc3-2110-rs29s> (дата обращения: 04.09.2022).
3. Р.В. Лапко, Е.Г. Лапухин. Организация приема телеметрии с КА в формате cubesat sputnix // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч. конф.) : в 2 т. / СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Том 1. С. 412-413.
4. СПУТНИКС Приборы CubeSat [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/> (дата обращения: 02.09.2022).
5. Effective throughput of AX.25 protocol [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/275923166\\_Effective\\_throughput\\_of\\_AX25\\_protocol](https://www.researchgate.net/publication/275923166_Effective_throughput_of_AX25_protocol) (дата обращения: 01.09.2022).

### References

1. Kadadova A.V., Utkin V.V., [CubeSat fault analysis. Prospects for stratospheric launches] Gagarinskiye chteniya: sbornik thesisov robot ucastnikov XLVII mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii [Proc. 14th Int. scient. "Gagarin readings"]. Moscow, 2021, P. 654-655 (In Russ).
2. Voenmeh's satellite in space [Electronic resource]. URL: <https://www.voenmeh.ru/news/science/sostoyalsya-zapusk-cubesat-sxc3-2110-rs29s> (access: 04.09.2022).
3. R.V Lapko., E.G. Lapukhin., [Receive of telemetry of cubesat of the Sputnix format] // Reshetnevskiye chteniya : materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proc. 14th Int. scient. and pract. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2021, Vol. 1. P. 412-413 (In Russ).
4. SPUTNIX CubeSat devices [Electronic resource]. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/> (access: 02.09.2022).
5. Effective throughput of AX.25 protocol [Electronic resource]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/275923166\\_Effective\\_throughput\\_of\\_AX25\\_protocol](https://www.researchgate.net/publication/275923166_Effective_throughput_of_AX25_protocol) (access: 01.09.2022).

© Кадочников Д. М., Уткин В. В., Кададова А. В., Гончаров В. О., 2022

УДК 629.78

**ПРОЕКТ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ФОРМ-ФАКТОРА CUBESAT  
С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ КРИОГЕННЫМ МОДУЛЕМ**

Т. Ш. Комбаев<sup>1\*</sup>, М. Е. Артемов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал АО «НПО Лавочкина» г. Калуга  
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

*Одним из путей улучшения технических характеристик космических аппаратов является применение в их составе высокотемпературных сверхпроводников, это позволит снизить массу некоторых бортовых токопроводящих систем и увеличить их КПД. Экспериментальную отработку получения криогенных температур с помощью пассивных средств обеспечения теплового режима предлагается провести на КА форм-фактора CubeSat.*

*Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники, космический аппарат, тепловые экраны, CubeSat.*

**CUBESAT FORM FACTOR SPACECRAFT PROJECT  
WITH EXPERIMENTAL CRYOGENIC MODULE**

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

*One way to improve the technical characteristics of spacecraft is the use of high-temperature superconductors. This could reduce the mass of some onboard electrical conductive systems and increase their efficiency. Experimental testing of obtaining cryogenic temperatures using passive means of providing a thermal regime is proposed to be carried out on the CubeSat form factor spacecraft.*

*Keywords: high-temperature superconductors, spacecraft, heat shields, CubeSat.*

Одним из путей улучшения технических характеристик космических аппаратов (КА) является применение в их конструкции и бортовых системах новых материалов и технологий. Одной из таких технологий является сверхпроводимость. Сверхпроводники позволяют снизить массу токопроводящих систем и увеличить их КПД.

До настоящего времени сверхпроводники на КА не применялись, в случае с низкотемпературными сверхпроводниками из-за необходимости наличия криогенных систем для доведения сверхпроводников до критической температуры (минус 269 °С) при которой достигается сверхпроводимость, в случае с высокотемпературными сверхпроводниками (минус 196 °С) из-за их высокой стоимости. Современное развитие технологий позволило создать относительно недорогие высокотемпературные проводники 2-го поколения (ВТСП), которые получают всё большее распространение в наземных условиях в электроэнергетике и технике [1].

Промышленное производство высокотемпературной сверхпроводящей ленты 2-го поколения освоено в РФ ЗАО «СуперОкс» [2]. ВТСП лента 2-го поколения производства ЗАО «СуперОкс» облада-

ет следующими характеристиками: критический ток при минус 196 °С ленты толщиной 100 мкм и шириной 12 мм равен от 300 до 500 А.

Исследование технологической возможности применения ВТСП ленты 2-го поколения на КА имеет прикладное значение для развития космических технологий. В настоящее время успешно пройдены испытания ВТСП-электромагнита для электроракетных двигателей КА со сниженным в 20 раз электропотреблением и уменьшенной в 4 раза массой по сравнению с аналогами на основе медных проводов [3], проводятся исследования возможностей использования сверхпроводников при освоении Луны [4], а также для защиты пилотируемых космических аппаратов от ионизирующего космического излучения [5].

Одним из способов обеспечения криогенных температур для работы ВТСП в космическом пространстве является использование экранов, которые последовательно ослабляют тепловой поток, приходящий на КА от внешних источников и позволяют получать криогенные температуры достаточные для функционирования ВТСП. Экспериментальную отработку данного способа обеспечения работы ВТСП в космическом пространстве можно провести на КА форм-фактора CubeSat (нано-КА). Аналогичный эксперимент по снижению температуры до минус 160 °С пассивными средствами терморегулирования – двумя тепловыми экранами на низкой околоземной орбите проводился на экспериментальном нано-КА CryoCube 1. На CryoCube 1 проводились эксперименты с жидким кислородом под давлением [6].

Для обеспечения возможности функционирования ВТСП на борту нано-КА необходимо обеспечить температуру на ВТСП ниже минус 196 °С пассивными средствами терморегулирования. Данную задачу предлагается решить следующими инструментами:

- разворачиваемые пленочные экраны, последовательно ослабляющие тепловой поток от Солнца и Земли до требуемых значений;
- конструкция нано-КА, минимизирующая кондуктивные тепловые потоки в зону ВТСП;
- система управления движением относительно центра масс нано-КА для программной ориентации пленочных экранов относительно Солнца и Земли.

В состав экспериментального нано-КА должны входить:

1. Платформа форм-фактора CubeSat;
2. Технологический модуль в который входят пленочные тепловые экраны, ВТСП, источник питания и блок сбора данных.

Платформа форм-фактора CubeSat обеспечивает необходимые условия функционирования технологического модуля, а также осуществляет связь с наземным комплексом управления. Технологический модуль является автономным модулем, с тепловой точки зрения максимально развязанным с платформой.

Создание вышеописанного нано-КА и его попутный запуск на низкую околоземную орбиту позволит проверить конструкторские решения, обеспечивающие функционирование ВТСП пассивными средствами терморегулирования и оценить возможность последующего применения ВТСП на КА.

### Библиографические ссылки

1. Высоцкий В.С. Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия // *Электричество*, 2014, №11, с. 4-16.
2. ЗАО «СуперОкс». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.superox.ru> (дата обращения 07.09.2022 г.).
3. A.P. Vavilov, A.A. Troitskiy, I.D. Egorov, S.V. Samoilenkov. Magnetoplasma dynamic thruster with an applied field based on the second generation high temperature superconductors // *Journal of Physics: Conference Series* 1686 (2020) 012023, doi: 10.1088/1742-6596/1686/1/012023.
4. Некоторые возможные области использования технологий высокотемпературной сверхпроводимости в программе освоения Луны / Маевский В.А., Асеев В.В., Ивлев А.С. и др. // *Космическая техника и технологии* № 2(25)/2019, С. 14-27, doi: 10.33950/spacetech-2308-7625-2019-2-14-27.
5. F. Ambrogliani, R. Battiston and W.J. Burger. Evaluation of Superconducting Magnet Shield Configurations for Long Duration Manned Space Missions // *Front. Oncol.* 6:97, doi: 10.3389/fonc.2016.00097.
6. J.J. Berg., J.M. Oliveira, J.F. Congiargo. Thermal Performance of a Cryogenic Fluid Management Cubesat Mission // *TFAWS 2013-July 29-August 2, 2013*.

### References

1. Vysockij V.S. *Krupnomasshtabnye primeneniya sverhprovodimosti spustya stoletie posle ee otkrytiya* [Large scale applications of superconductivity a century after its discovery]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 11, p. 4-16. (In Russ.).
2. SuperOx. Available at: <http://www.superox.ru> (accessed 07.09.2022 г.).
3. A.P. Vavilov, A.A. Troitskiy, I.D. Egorov, S.V. Samoilenkov. Magnetoplasmadynamic thruster with an applied field based on the second generation high temperature superconductors. *Journal of Physics: Conference Series* 1686 (2020) 012023, doi:10.1088/1742-6596/1686/1/012023.
4. Maevskij V.A., Aseev V.V., Ivlev A.S. and oth. *Nekotorye vozmozhnye oblasti ispol'zovaniya tekhnologij vysokotemperaturnoj sverhprovodimosti v programme osvoeniya Luny* [Some possible areas of application of high-temperature superconductivity technologies in the lunar exploration program]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2019, No. 2(25)/2019, P. 14-27. (In Russ.). doi: 10.33950/spacetech-2308-7625-2019-2-14-27.
5. F. Ambroglini, R. Battiston and W.J. Burger. Evaluation of Superconducting Magnet Shield Configurations for Long Duration Manned Space Missions. *Front. Oncol.* 6:97, doi: 10.3389/fonc.2016.00097.
6. J.J. Berg., J.M. Oliveira, J.F. Congiargo. Thermal Performance of a Cryogenic Fluid Management Cubesat Mission. *TFAWS* 2013-July 29-August 2, 2013.

© Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е., 2022

УДК 004.728

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕКА СЕТЕВЫХ ПРОТОКОЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СЕТЕЙ

Н. Д. Кустов\*, К. С. Евдокимов

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 определены ограничения и требования к сетевым технологиям, которые применяются в космических интегрированных сетях на основе малых космических аппаратов. Сформирован стек сетевых технологий и протоколов, который соответствует приведенным требованиям.*

*Ключевые слова: наноспутники, космическая интегрированная сеть, CubeSat, LoRa, 6LoWPAN.*

## DEFINITION OF THE NETWORK PROTOCOL STACK AND TECHNOLOGIES FOR SPACE INTEGRATED NETWORKS

N. D. Kustov\*, K. S. Evdokimov

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

*The paper defines the limitations and requirements for network technologies that are used in space integrated networks based on small spacecraft. The stack of network technologies and protocols that meets the requirements is determined.*

*Keywords: nanosatellites, space integrated network, CubeSat, LoRa, 6LoWPAN.*

Стремительно возрастающее количество пользователей глобальных сетей и предоставляемых такими сетями услуг (интернет вещей, облачные вычисления, большие данные и т. п.) [1] вызывают необходимость решения ряда задач. Для решения этих задач разрабатываются новые стандарты и технологии (например, 5G). Однако эти технологии напрямую зависят от наземных станций и не смогут обеспечить услуги беспроводного доступа в любой точке земли, особенно в труднодоступных её районах. В настоящее время одной из наиболее привлекательных альтернатив оказалась идея объединения сегментов космической и наземной сетей, образующих интегрированную космическую сеть. Основу космического сегмента, как правило, составляют малые космические аппараты типа CubeSat. Для того, чтобы обеспечить функционирование такой архитектуры и, кроме того, соответствие некоторым функциональным требованиям и техническим ограничениям, необходимо определить систему сетевых технологий, которые могут быть применены в рамках данной задачи.

Как было упомянуто выше, существует ряд функциональных требований и технических ограничений, связанных со спецификой подобной архитектуры. В целях систематического рассмотрения вопроса представляется необходимым дать им определения.

Технические ограничения:

- низкая стоимость электронной компонентной базы (что обусловлено идеологией стандарта CubeSat);
- возможность передачи на большое расстояние (дальность передачи определяется расстоянием от центра управления полетами до космического аппарата на низкой околоземной орбите (500-2000 км));
- высокая энергоэффективность (в связи с ограниченной емкостью аккумулятора космического аппарата и низкой производимой мощностью);

– низкое потребление аппаратных ресурсов (так как используемые микроконтроллеры обладают относительно низкой производительностью).

Функциональные требования:

– универсальность сетевых протоколов (среда передачи гетерогенна: должна обеспечиваться возможность использования стандартных протоколов стека TCP/IP [2] и передача между сегментами сети с минимальным преобразованием);

– эффективное использование пропускной способности канала связи (в связи с низкой скоростью передачи должно применяться сжатие заголовков и минимизировано количество операций фрагментации и сборки);

– специализированная динамическая маршрутизация (космические аппараты образуют ячеистую топологию и обладают высокой мобильностью);

– автоконфигурация с короткими сетевыми адресами (централизованное управление сетевыми адресами отсутствует, а длинные адреса уменьшают объем полезной нагрузки);

– адаптивность стандартных прикладных протоколов (возможность адаптировать «тяжелые» прикладные протоколы);

– функции безопасности (для обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности передаваемых данных).

Исходя из данных требований и ограничений был определен набор сетевых технологий разного уровня, функциональные особенности которых соответствуют поставленной задаче.

В качестве технологии физического уровня было решено выбрать одну из технологий группы LPWAN (Low-power Wide-area Network) [3]. Среди прочих наиболее перспективной представляется технология LoRa, которая в последние годы является негласно признанной научным и инженерным сообществом как наиболее подходящая для спутниковых систем [4]. Положительными особенностями данной технологии являются: высокая дальность передачи радиосигнала; низкое энергопотребление конечных устройств; высокая помехоустойчивость; использование диапазонов нелицензируемых частот.

Для технологии LoRa (Long Range) организацией LoRa Alliance описан сетевой протокол канального уровня – LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [5]. В сетях LoRaWAN обычно используется топология «звезда», в которой шлюзы ретранслируют кадры между конечными устройствами и центральным сетевым сервером. В перечисленных выше требованиях было упомянуто, что узлы в космическом сегменте образуют ячеистую топологию. Отсюда можно сделать вывод, что протокол LoRaWAN является непригодным в рамках поставленной задачи. В качестве альтернативы был выбран протокол канального уровня стандарта 802.15.4. Несмотря на то, что данный стандарт был разработан для сетей LoWPAN (Low power Wireless Personal Area Networks), технические параметры физического уровня стандарта 802.15.4 схожи с параметрами технологии LoRa.

Для 802.15.4 был разработан протокол 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks) [6], определяющий уровень адаптации между 802.15.4 MAC (Media Access Control) и широко известным сетевым протоколом IPv6 (Internet Protocol version 6). Данный протокол обеспечивает фрагментацию кадров, сжатие заголовков, механизм автоконфигурации коротких сетевых адресов и маршрутизацию при помощи дополнительного протокола RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), что закрывает большую часть функциональных требований, описанных выше.

В свою очередь, протокол 6LoWPAN позволяет интегрировать протокол IPv6 на сетевом уровне и, соответственно, протоколы UDP (User Datagram Protocol) и TCP (Transmission Control Protocol) – на транспортном уровне, что обеспечивает условие универсальности.

Помимо стандартных прикладных протоколов существует возможность использовать в данном стеке протокол CoAP (Constrained Application Protocol), облегченный HTTP-протокол для интернета вещей.

При этом функции безопасности могут быть обеспечены на канальном уровне алгоритмом шифрования AES (Advanced Encryption Standard), на уровне адаптации – протоколом LSEND (Lightweight Secure Neighbor Discovery Protocol), а на прикладном уровне – привычным протоколом SSL (Secure Sockets Layer).

В результате проведенной работы был сформирован стек сетевых протоколов для космических интегрированных сетей в соответствии с техническими ограничениями и функциональными требованиями, применяемыми к таким сетям.

Практическая реализация и внедрение предложенного набора сетевых технологий планируется в рамках космической миссии ReshUCube-2.

### Библиографические ссылки

1. Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey / J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah and all. // in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018. Vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741.
2. A TCP/IP Tutorial [Электронный ресурс]. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1180> (дата обращения: 27.08.2022).
3. Low-Power Wide Area Network (LPWAN) Overview. [Электронный ресурс]. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8376> (дата обращения: 27.08.2022).
4. Laboratory testing of LoRa modulation for CubeSat radio communications / Doroshkin A., Zadorozhny A., Kus O. and all. // VI International forum for young scientists Space Engineering 2018. P. 1-5. 14.
5. LoRaWAN® Specification v1.1 [Электронный ресурс]. URL: <https://resources.lora-alliance.org/document/lorawan-specification-v1-1> (дата обращения: 28.08.2022).
6. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4944> (дата обращения: 30.08.2022).

### References

1. Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey / J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah and all. // in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018. Vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741.
2. A TCP/IP Tutorial. Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1180> (accessed: 27.08.2022).
3. Low-Power Wide Area Network (LPWAN) Overview. Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8376> (accessed: 27.08.2022).
4. Laboratory testing of LoRa modulation for CubeSat radio communications / Doroshkin A., Zadorozhny A., Kus O. and all. // VI International forum for young scientists Space Engineering 2018. P. 1-5. 14.
5. LoRaWAN® Specification v1.1. Available at: <https://resources.lora-alliance.org/document/lorawan-specification-v1-1> (accessed: 28.08.2022).
6. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks. Available at: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4944> (accessed: 30.08.2022).

© Кустов Н. Д., Евдокимов К. С., 2022

УДК 521; 521.1; 521.3, 521.1:[629.783:523.3]/.4

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОВОРОТНОГО МЕХАНИЗМА АНТЕНН ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ С КУБСАТАМИ УНИВЕРСИТЕТА

Е. Г. Лапухин\*, А. П. Калмыков, В. В. Аброськин, В. А. Подобайлова

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@sibsau.ru

*Предварительный расчёт положения спутника и автоматизация вращения антенны исключают риски неверного наведения. В работе изложены основные моменты расчета положения и автоматизации поворотного механизма в ЦУП СибГУ им. М. Ф. Решетнева.*

*Ключевые слова: целеуказания, топоцентрическая система координат, небесная система координат, поворотное устройство, контроллер, азимут, угол места.*

## AUTOMATION ROTATORS OF ANTENNAS FOR COMMUNICATION WITH RESHUCUBE'S

E. G. Lapukhin\*, A. P. Kalmykov, V. V. Abros'kin, V. A. Podobaylova

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

*Preliminary satellite position calculation and antenna rotation automation eliminate the risk of incorrect pointing. The paper outlines the main points of the calculation of the position and automation of the rotary mechanism in the Mission Control Center of Reshetnev University.*

*Keywords: target designation, topocentric coordinate system, celestial coordinate system, rotator, controller, azimuth, elevation.*

9 августа 2022 года с космодрома Байконура был запущен космический летательный аппарат ReshUCub-1 [1] Сибирского государственного университета науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва. Прием и фиксация телеметрических данных космического спутника осуществляется в Студенческом центре управления полётами (СЦУП) университета.

Для оптимизации процесса радиосвязи с аппаратом возникла потребность в создании автоматического управления поворотным устройством и соответствующего для него программного обеспечения. В связи с этим был разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс для ориентации антенны на ИСЗ (высота над горизонтом и азимут относительно точки расположения антенных устройств).

Аппаратно-программный комплекс состоит из следующих блоков: ЭВМ с программным обеспечением, блока управления поворотным устройством, поворотного устройства G5500, антенны, трансивера.

Программное обеспечение, установленное на ЭВМ определяет положение ИСЗ по исходным данным – TLE (two-line element set, двухстрочный набор элементов). Выходными данными программного обеспечения является положение ИСЗ на небесной сфере (высота и азимут). Далее эти выходные данные передаются на вход блока управления поворотным устройством.

**Расчет координат.** Расчет положения КА в наземной системе координат сводится к тому, что в момент времени  $T_i$  вычисляется радиус вектор наблюдателя  $r_{\text{набл}}$  в инерциальной системе координат  $(I, J, K)$  с учетом прецессии, нутации и вращения Земли (параметры  $x_p, y_p, UT_1$ ). В этот же момент времени  $T_i$  вычисляется радиус вектор спутника  $r_{\text{сп}}$ , используя баллистическую модель расчета SGP4 [2]. Затем определяется вектор  $\rho_{\text{сп}}$  направления на спутник из точки наблюдения  $\rho_{\text{сп}} = r_{\text{сп}} - r_{\text{набл}}$  (рис.1). Далее, координаты вектора  $\rho_{\text{сп}}$  пересчитываются обратно в земную геоцентрическую неинер-

циальную систему координат  $(X, Y, Z)$  и далее в топоцентрическую экваториальную или горизонтальную систему координат (рис.2). Данный алгоритм использовался в расчете целеуказаний для лазерной локации малого космического аппарата «Юбилейный-2» («МИР») [3, 4].

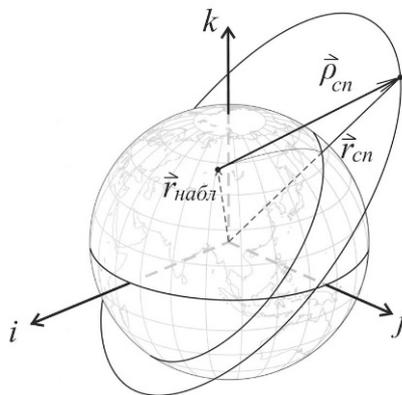


Рис. 1. Инерциальная система координат и векторы положения наблюдателя и спутника

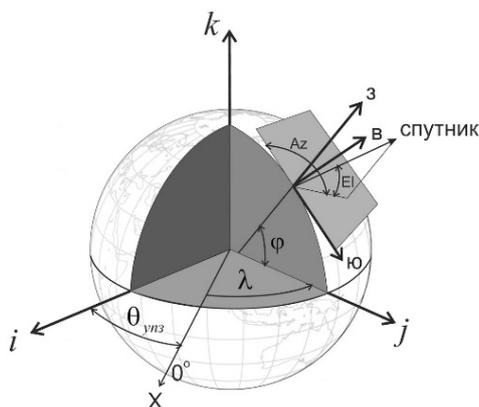


Рис. 2. Геометрия топоцентрической горизонтальной системы координат ЮВЗ

По данному алгоритму авторами реализована программа по расчету координат КА. Входными данными являются параметры вращения Земли ( $x_p, y_p, \Delta UT$ ), время расчета (UTC), положение пункта наблюдения (геодезические широта  $\varphi$  и долгота  $\lambda$ ) и двусторонние элементы орбиты спутника (TLE). Результатом расчета программы являются координаты спутника в экваториальной и топоцентрической горизонтальной системе координат. В программе также реализована возможность пересчета экваториальных небесных координат второго типа в азимутальные топоцентрические в режиме реального времени, работа по эфемеридам и ручное управление (произвольная установка высоты и азимута).

**Блок управления поворотным устройством** конструктивно состоит из электронных компонентов и корпуса. Схематично блок управления поворотным устройством Yeasu-5500 состоит из следующих компонентов (рис. 3): программируемый контроллер на базе ATmega328P, Arduino Nano V3 (1), жидкокристаллический дисплей LCD 1602 с интерфейсом I2C (2), четырехканальный модуль электромагнитных реле (3), выключатель питания (4), светодиодные индикаторы состояния (5).

Программа расчета координат по COM-порту передает значение азимута и высоты на контроллер. На обмотки двигателей поворотного устройства подается напряжение в соответствии с координатами. Сопротивление реостатов внутри корпуса устройства соответствует определенному положению азимута и высоты. Благодаря обратной связи контроллер перестает вращать поворотное устройство при достижении заданных координат.

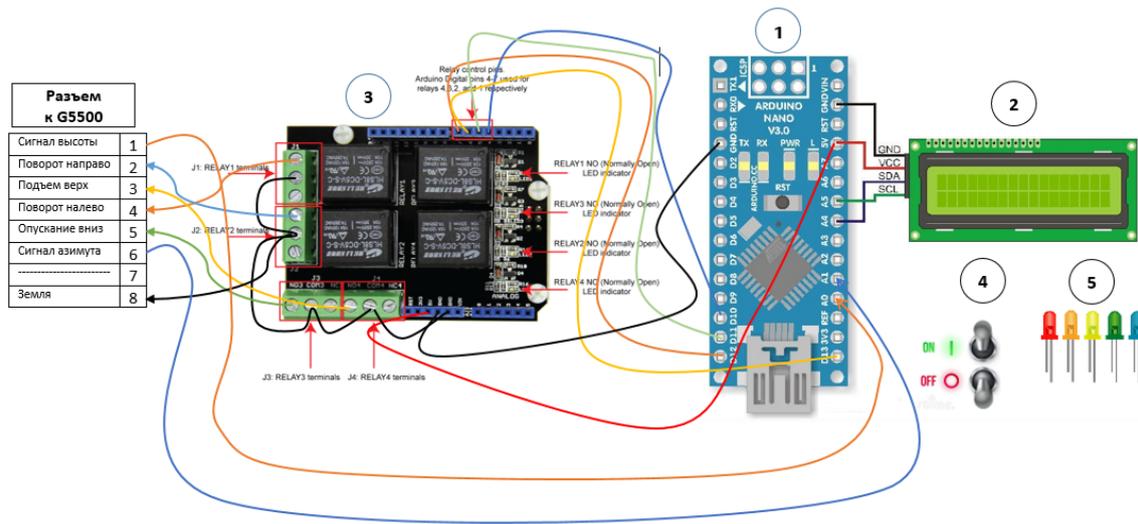


Рис. 3. Состав блок управления поворотным устройством

**Корпус** для электронной части поворотного устройства предполагается изготовить с использованием 3D-печати и использованием пластика (PLA, PVA, ABS и др.). Макет корпуса разработан в программе Компас-3D. Минимальные размеры корпуса выбраны исходя из комплектующих, а именно LCD дисплея, четырех контактного реле, а также платы Arduino Nano и составляют 120x80x60mm. На крышке корпуса расположен дисплей, с индикаторами. С боковой части корпуса находится вывод для кабеля питания и кабеля для передачи сигнала с реле непосредственно на поворотное устройство. Фиксация крышки – на болтах.

Таким образом, автоматическое сопровождение по рассчитанным целеуказаниям спутника и автоматизация вращения антенны исключат риски неверного наведения связанных с человеческим фактором, что в свою очередь повысит надежность радиосвязи с космическим аппаратом ReshUCube-1 разработанным в лаборатории МКА СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

### Библиографические ссылки

1. ReshUCube-1, космический аппарат формата CubeSat 3U [Электронный ресурс]. URL: <https://sat.sibsau.ru/page/reshucube-1> (дата обращения: 09.09.2022).
2. Vallado, David A., Paul Crawford, Richard Hujak, and T.S. Kelso, "Revisiting Spacetrack Report #3," presented at the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, CO, 2006 August 21–24.
3. Лапухин, Е. Г. МКА "Юбилейный-2": расчет положения, ПЗС-наблюдения, анализ / Е. Г. Лапухин, Л. В. Границкий, В. М. Владимиров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1. № 9. С. 133-135.
4. Владимиров В. М., Модестова Г. И., Емельянов В. А. [и др.] Опыт наблюдения малого КА "М. Решетнев" на лазерной станции в Иркутске // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2017. № 42. С. 72-78.

### References

1. ReshUCube-1, spacecraft CubeSat 3U. Available at: <https://sat.sibsau.ru/page/reshucube-1> (accessed 09.09.2022).
2. Vallado, David A., Paul Crawford, Richard Hujak, and T.S. Kelso, "Revisiting Spacetrack Report #3," presented at the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Keystone, CO, 2006 August 21–24.
3. Lapukhin E. G. ["Yubileynyy-2": observation position calculation analysis] Aktual'nye problemy aviat-sii i kosmonavtiki. 2013. T. 1. № 9. S. 133-135.
4. Vladimirov V. M. [Experience of observation of the small spacecraft "M. Reshetnev" at the laser station in Irkutsk] Trudy Instituta prikladnoy astronomii RAN. 2017. № 42. S. 72-78.

© Лапухин Е. Г., Калмыков А. П., Аброськин В. В., Подбайлова В. А., 2022

УДК 621.396.946.2

## ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ УКВ-СВЯЗИ С RESHUCUBE-1 В СЦУП СИБГУ ИМ. М. Ф. РЕШЕТНЕВА

Е. Г. Лапухин\*, С. А. Чекмарев, А. В. Шахматов, В. В. Аброськин,  
В. А. Подобайлова, А. П. Калмыков

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@sibsau.ru

*В работе изложены основные моменты реализации УКВ-связи с комическим аппаратом ReshUCube-1 в студенческом Центре управления полетами СибГУ им. М. Ф. Решетнева и рассмотрены возможные конфигурации оборудования и локальные проблемы.*

*Ключевые слова: ReshUCube-1, кубсат, УКВ-связь, ЦУП, помеховая обстановка.*

## FEATURES OF MADE OF VHF COMMUNICATION WITH RESHUCUBE-1 AT RESHETNEV UNIVERCITY

E. G. Lapukhin\*, S. A. Chekmarev, A. V. Shakhmatov, V. V. Abros'kin,  
V. A. Podobaylova, A. P. Kalmykov

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

*The article shows the main points of the implementation of VHF communication with the ReshUCube-1 satellite in the Student Mission Control Center of Reshetnev University. Also showed equipment options of MCC and local problems are also considered.*

*Keywords: ReshUCube-1, Cubesat, VHF communication, MCC, mission control center, radio interference.*

В настоящее время на солнечно-синхронной орбите находится космический аппарат ReshUCube-1 (позывной космического аппарата – RS8S). Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту 09 августа 2022 года совместно с кубсатами других ВУЗов и организаций. В течение суток после запуска в Студенческом центре управления полетами СибГУ им. М. Ф. Решетнева был налажен прием маяка спутника с инкапсулированными основными телеметрическими данными платформы.

Прием маяка спутника осуществлялся на оборудовании в двух различных аппаратных конфигурациях на двух разнесенных в пространстве антенных постах. Первая конфигурация включает в себя оборудование: антенна (445МГц), поворотное устройство Yeasu G-5500, трансивер ICom-910H, малошумящий усилитель G35 и программное обеспечение по приему и декодированию сигнала (Telemetry Viewer и Soundmodem).

Вторая конфигурация состоит из антенны (445МГц), поворотного устройства Yeasu G-5500, SDR-радио и программ (flowgraph, Telemetry Viewer, Houston appl.).

Основные характеристики сигналов с ReshUCube-1:

несущая частота – 435,38 МГц,  
тип модуляции – GMSK+USP,  
скорость передачи информации – 2400,  
расстояние до спутника – 500-2500 км,  
мощность бортового передатчика [1] – 2 Вт,  
мощность наземного передатчика (ICom910H)– 1-75 Вт.

Число проходов спутника в сутки – шесть: три в первой половине дня и три в ночное время. Длительность радиовидимости до 10 минут (рис. 1).

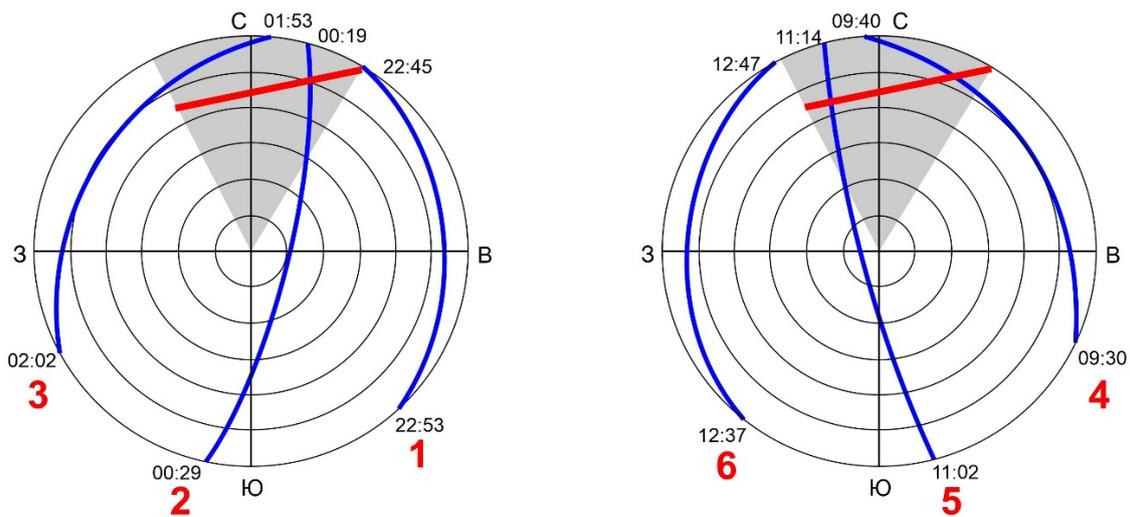


Рис. 1. Треки проходов спутника на небесной сфере на 17-18 августа (UTC+7, Красноярск):  
1-6 – последовательная нумерация проходов спутника

Одновременно с приемом сигналов со спутника ReshUCube-1 были осуществлены радио-приемы с других спутников запущенной группировки. В связи с тем, что СЦУП СибГУ им. М. Ф. Решетнева находится в зоне плотных промышленных помех удается принять сигналы не со всех спутников любительского радиодиапазона 435 МГц. Успешно принимаются сигналы до 437 МГц. Начиная с 437 МГц и до 440 МГц стабильный прием практически невозможен.

Успешно приняты и декодированы сигналы с КА RS29S (Военмех, GMSK+USP, AX.25) и также осуществляется прием сигналов с некоторыми трудностями с КА RS34S (Кузбасс), так как он находится в зоне плотной промышленной помехи (рис. 2).

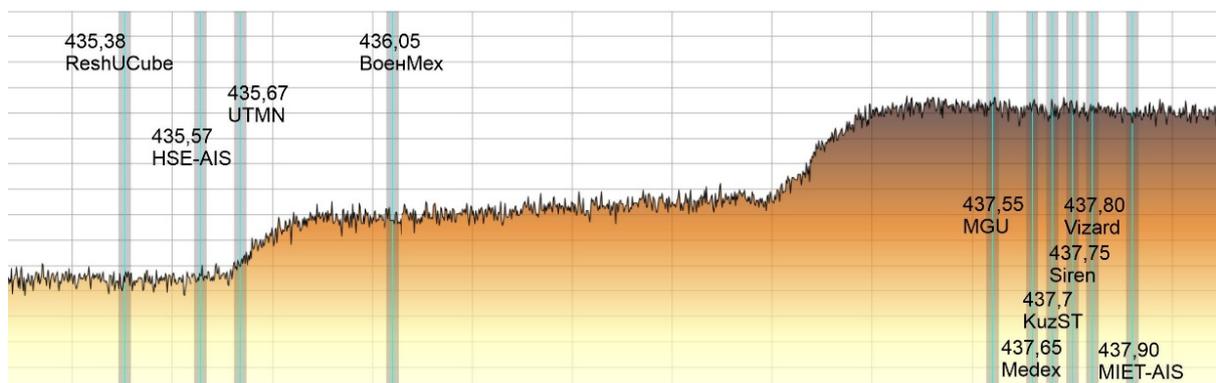


Рис. 2. Частотный план спутников и промышленные помехи

Для оптимизации приема телеметрии был разработан программно-аппаратный комплекс управления поворотным устройством Yeasu G-5500 и были написаны программы: 1) Plan – для расчета восхода и захода спутника (результат программы – файл с расписанием для запуска программ, используется в программе «autoStartTLM» и файл для планировщика для программы «Navigator»); 2) программа «radioControl» – устанавливает доплеровское смещение в программе «Gpredict»; 3) программа «autoStartTLM» – планировщик для запуска программ приема и декодирования телеметрии согласно расписанию.

Передача пакетов осуществляется по протоколу USP (разработка Спутникс [2]) [3]. Прием и декодирование осуществляется с помощью Flowgraph [4] для GnuRadio и Sputnik Telemetry Viewer [5]. Доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала учитывается и рассчитывается в программе

Gpredict [6]. Коррекция системного времени ЭВМ осуществляется с помощью ГЛОНАСС/GPS-приемника.

После проверки разработчиком работоспособности платформы спутника в середине сентября космический аппарат ReshUCube-1 был принят в эксплуатацию университетом.

Таким образом, тестовые испытания по приему телеметрии с ReshUCube-1 и передачи команд на спутник проведены успешно и спутник принят в эксплуатацию для дальнейшего выполнения программы.

#### Библиографические ссылки

1. УКВ-приемопередатчик SXC-UHF-02 [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboiyi/priboiy-cubesat/ukv-priemoperedatchik> (дата обращения: 10.09.2022).
2. ООО Спутниковые инновационные космические системы [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/> (дата обращения: 10.09.2022).
3. Unified SPUTNIX protocol (USP). Protocol description [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/tpl/docs/amateurs/USP%20protocol%20description%20v1.04.pdf> (дата обращения: 10.09.2022).
4. SPUTNIX repositories. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/sputnixru/SX-USP> (дата обращения: 10.09.2022).
5. SPUTNIX Telemetry Viewer [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/tpl/docs/SX-TLM-Viewer-0.0.0-win32-ru.zip> (дата обращения: 10.09.2022).
6. Real-time satellite tracking Gpredict. [Электронный ресурс]. URL: <http://gpredict.oz9aec.net/> (дата обращения: 10.09.2022).

#### References

1. UHF transceiver SXC-UHF-02 Available at: <https://sputnix.ru/ru/priboiyi/priboiy-cubesat/ukv-priemoperedatchik> (accessed: 10.09.2022).
2. SPUTNIX LLC Available at: <https://sputnix.ru/ru/> (accessed: 10.09.2022)
3. Unified SPUTNIX protocol (USP). Protocol description Available at: <https://sputnix.ru/tpl/docs/amateurs/USP%20protocol%20description%20v1.04.pdf> (accessed: 10.09.2022).
4. SPUTNIX repositories. Available at: <https://github.com/sputnixru/SX-USP> (accessed: 10.09.2022).
5. SPUTNIX Telemetry Viewer Available at: <https://sputnix.ru/tpl/docs/SX-TLM-Viewer-0.0.0-win32-ru.zip> (accessed: 10.09.2022).
6. Real-time satellite tracking Gpredict. Available at: <http://gpredict.oz9aec.net/> (accessed: 10.09.2022).

© Лапухин Е. Г., Чекмарев С. А., Шахматов А. В., Подобайлова В. А.,  
Аброськин В. В., Калмыков А. П., 2022

УДК 52-323.8

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ АКТИВНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ФОРМАЦИЕЙ НАНОСПУТНИКОВ

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.1255555@mail.ru

*Рассмотрена возможность контроля расстояния между спутниками формации с применением дифференциальной аэродинамической силы. Предложено использование программных возможностей GMAT для моделирования орбитального движения.*

*Ключевые слова: аэродинамическое управление, спутниковая формация, CubeSat, GMAT.*

## EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF ACTIVE AERODYNAMIC CONTROL OF THE FORMATION OF NANOSATELLITES

M. M. Lukyanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mishka.1255555@mail.ru

*The possibility of controlling the distance between the formation satellites using differential aerodynamic force is considered. The use of GMAT software capabilities for modeling orbital motion is proposed.*

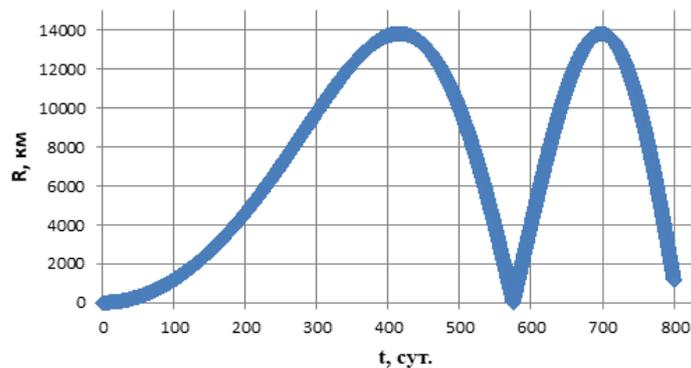
*Keywords: aerodynamic control, satellite formation, CubeSat, GMAT.*

**Введение.** В ракетно-космической отрасли наблюдается увеличение числа миссий, реализуемых в формате группового полета космических аппаратов. Применение формации спутников позволяет расширить возможности проведения космических экспериментов. Кроме того, наличие межспутниковой радиолинии в архитектуре связи позволяет повысить оперативность системы управления полетом. В связи с этим актуальна проблема управления относительным движением спутников. Для наноспутников класса CubeSat [1], зачастую не обладающими реактивным двигателем, интерес представляют методы управления, не требующие расхода рабочего тела. Популярность использования силы аэродинамического сопротивления для устранения относительного дрейфа между спутниками обусловлена упрощенным запуском, эффективным контролем без расхода топлива и устранением рисков нанесения повреждений спутникам в результате действия реактивных двигателей [2]. Эффективность аэродинамического контроля может быть продемонстрирована на примере формации из 12 спутников CubeSat Flock 2p, запущенной компанией Planet Labs в июне 2016 года, на солнечно-синхронную орбиту высотой 510 км [3].

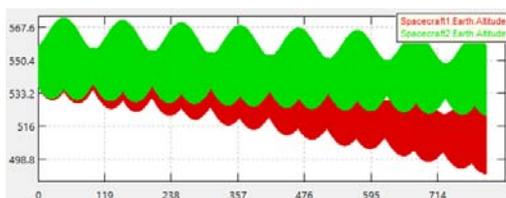
**Аэродинамическое управление формацией.** Аэродинамическое взаимодействие спутника с остаточной атмосферой на орбите включает в себя силу сопротивления, направленную против вектора скорости, и подъемную силу, перпендикулярную плоскостям, с которыми сталкиваются молекулы атмосферы. Аэродинамические коэффициенты могут быть определены с помощью физических моделей взаимодействия газа с поверхностью аппарата. Используемое ранее гипертермическое приближение предполагает, что все молекулы падающего на поверхность спутника газа движутся в одном направлении. Однако атмосферные температуры на высотах до 600 км достаточно высоки, чтобы средняя тепловая скорость молекул составляла значительную долю орбитальной скорости спутника, что делает геотермальное приближение неточным. Более достоверные значения коэффициентов могут быть получены с помощью аппроксимации формы спутника методом конечных пластинчатых элементов и применения к каждой плоскости аппарата теории молекулярного свободного течения [4].

Активное управление относительным движением можно обеспечить созданием дифференциальной силы аэродинамического сопротивления – разности тормозных сил, с которыми атмосфера воздействует на каждый из спутников. При рассмотрении движения двух космических аппаратов, идентичных по размерам, форме и массе, дифференциальная сила реализуется путем изменения ориентации спутников относительно направления их скорости. При моделировании, как правило, рассматривают спутники, состоящие из сферической центральной части и тонкой тормозящей пластины, например, солнечные панели. Аэродинамическая сила, действующая на их центральную часть, не зависит от ее ориентации. Дифференциальная сила создается изменением положения тормозящей пластины по отношению к набегающему потоку воздуха.

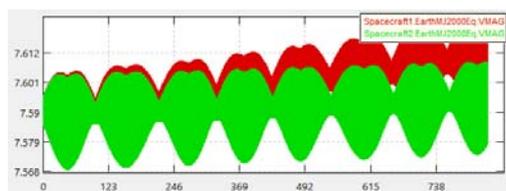
**Моделирование орбитального движения.** Рассматривается возможность активного аэродинамического управления формацией аппаратов CubeSat 3U, не имеющих разворачиваемых панелей. Тормозящими пластинами будут выступать сами грани спутников. Ориентация аппарата определяет значение его площади эффективного сечения относительно набегающего потока газа в диапазоне  $100 - 436 \text{ см}^2$ . Изменение данного параметра обеспечивает дифференциальную силу, влияющую на изменение относительного движения аппаратов. Для оценки такого управления использована программная система GMAT [5], предоставляющая возможности моделирования и визуализации космических миссий. Проведено исследование орбитального движения двух идентичных аппаратов CubeSat 3U массой 4 кг, выведенных на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 550 км с наклоном  $97,6^\circ$ . Оценка скорости расхождения двух аппаратов под действием дифференциальной силы приведена в графическом виде на рисунке.



a



б



в

Зависимость относительного межспутникового расстояния (а),  
высоты орбит (б) и скорости спутников (в) от времени

Спутники имеют одинаковое начальное положение и скорость. Первый спутник ориентирован вдоль направления скорости своего движения и имеет минимальную площадь эффективного сечения:  $100 \text{ см}^2$ , а второй имеет свободную ориентацию, для которой характерно значение эффективного сечения  $350 \text{ см}^2$ . GMAT имеет встроенную гравитационную модель, а также эмпирические модели возмущающих воздействий: давления солнечного излучения и атмосферного торможения MSISE-90, включающая в себя значения плотности, температуры и других параметров атмосферы в зависимости от высоты и положения спутника и солнечной активности. Анализ графиков показывает: спутник с большим эффективным сечением ускоряется относительно аппарата с меньшим сечением (рис. 1 в). Этот эффект, называемый аэродинамическим парадоксом спутника, объясняется увеличением его скорости со снижением высоты орбиты (рис. 1 б) в результате воздействия сопротивления атмосферы.

Таким образом, дифференциальную аэродинамическую силу возможно использовать для сближения спутников, разошедшихся после группового запуска вдоль орбиты. За счет незначительного снижения высоты спутника можно увеличить его орбитальную скорость. В проведенном эксперименте через год после выведения аппаратов на орбиту возникла разница высот в 10 км, которая привела к разнице скоростей в 6 м/с. Управляя разницей в высоте орбит спутников формации с помощью изменения ориентации, можно добиться их сближения и удержания необходимой дистанции. Данная схема управления может быть использована для проведения эксперимента по установлению межспутниковой связи.

### Библиографические ссылки

1. CubeSat Design Specification [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cubesat.org/cubesatinfo/> (дата обращения 02.09.2022).
2. Андриевский Б., Кузнецов Н., Попов А. Алгоритмы аэродинамического управления относительным движением двух спутников по околокруговой орбите // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2020. № 4. С. 28–58.
3. Constellation phasing with differential drag on Planet Labs satellites / C. Foster, J. Mason, V. Vittaldev, L. Leung, V. Beukelaers, L. Stepan, R. Zimmerman // Journal of Spacecraft and Rockets, 2017. Vol. 55. № 2. P. 473–483.
4. Harrison I., Swinerd G., A free molecular aerodynamic investigation using multiple satellite analysis, Planet. Space Sci., 1996. Vol. 44. № 2. P. 171–180.
5. General Mission Analysis Tool (GMAT) v.R2016a [Электронный ресурс]. URL: <https://software.nasa.gov/software/GSC-17177-1> (дата обращения 03.09.2022).

### References

1. CubeSat Design Specification. Available at: <https://www.cubesat.org/cubesatinfo/> (accessed 2.9.2022).
2. Andrievskij B., Kuznecov N., Popov A. Algoritmy ajerodinamicheskogo upravlenija odnositel'nym dvizheniem dvuh sputnikov po okolostrukovoj orbite [Algorithms for aerodynamic control of the relative motion of two satellites in a circular orbit]. Differential'nye upravlenija i processy upravlenija [Differential equations and control processes], 2020, no. 4, p. 28–58 (In Russ.).
3. Constellation phasing with differential drag on Planet Labs satellites / C. Foster, J. Mason, V. Vittaldev, L. Leung, V. Beukelaers, L. Stepan, R. Zimmerman // Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, vol. 55, no 2, p. 473–483.
4. Harrison I., Swinerd G., A free molecular aerodynamic investigation using multiple satellite analysis, Planet. Space Sci., 1996, vol. 44, no. 2, p. 171–180.
5. General Mission Analysis Tool (GMAT) v.R2016a. Available at: <https://software.nasa.gov/software/GSC-17177-1> (accessed 3.9.2022).

УДК 629.78

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАССЫ ПОЛЕТА СПУТНИКА

Д. В. Малыгин

Лаборатория «Астрономикон»  
Российская Федерация, 191119, г. Санкт-Петербург,  
Транспортный переулок, д. 1 литера А, пом. 408  
E-mail: Malygin.DV@astronomikon.ru

*В статье представлен комплект контрольно-измерительных приборов для идентификации и классификации по энергетическому спектру заряженных частиц, которые воздействуют на наноспутник форм-фактора CubeSat. Описываемый комплект позволит лучше понять воздействие радиации на доступную промышленную электронно-компонентную базу бортовой электроники. Архитектура и свойства CubeSat базируются на многоцелевой блочно-модульной платформе «Синергия».*

*Ключевые слова: наноспутник, cubesat, платформа, датчик радиации, регистратор излучений.*

## DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM THE FLOW OF CHARGED PARTICLES FOR ANALYSIS OF THE NANOSATELLITE FLIGHT PATH

D. V. Malygin

Nanosatellite design laboratory "Astronomikon"  
408, of, 1, Transportnyi alley, St. Petersburg, 191119, Russian Federation  
E-mail: Malygin.DV@astronomikon.ru

*The article presents a set of instrumentation for identification and classification according to the energy spectrum of charged particles that affect the nanosatellite of the CubeSat form factor. The described kit will make it possible to better understand the effect of radiation on the available industrial electronic-component base of on-board electronics.*

*Keywords: nanosatellite, cubesat, pikosatellite, platform, radiation sensor, emission recorder.*

Статья представляет собой одну из цикла работ по описанию концепта базового комплекта контрольно-измерительных приборов (КИП) платформы «Синергия» для измерения обстановки трассы полета СМКА [1]. Важно отметить, что рассматриваемый класс устройств накладывает жесткие масса-габаритные ограничения на элементно-компонентную базу (ЭКБ) КИП, при этом существуют подобные проекты: многопроволочный детектор для наноспутников (рис. 1) [2].

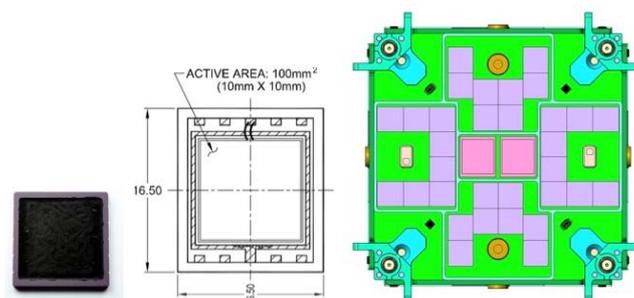


Рис. 1. Внешний вид и расположение КИП

Комплект КИП представляет собой твердотельный полупроводниковый прибор в виде портативного кремниевого фотодиодного детектора излучения в диапазоне 5keV-10MeV, способный регистрировать гамма-излучение низкой энергии. Устройство состоит из матрицы кремниевых PIN-диодов большой площади (100 мм<sup>2</sup>) с обратным смещением (выбор кандидата детектора представлен в таблице). Кремниевые диоды являются приемлемым выбором для большого числа ЭКБ, особенно когда речь идет о тяжело заряженных частицах. Поясним этот момент подробнее.

### Выбор КИП

Артикул	Производитель	Активная область, мм <sup>2</sup>
AXUV100	IRD	100
AXUV100GX	IRD	100
PS100-2-THD	First Sensor	100
PS100-5-THD	First Sensor	100
PS100-6-THD	First Sensor	100
PS100-7-CER-PIN	First Sensor	100
SMP2000G-MV	SemeLab	100
S3590-08	Hamamatsu Photonics	100
S3590-18	Hamamatsu Photonics	100
S6775	Hamamatsu Photonics	26.4

Рассмотрим типы детекторов ионизирующего излучения: газоразрядные (альфа, бета, гамма, нейтронов, фотонов, рентгеновского излучения, ионизационные камеры, блоки детектирования на основе газоразрядных счетчиков), сцинтиляционные детекторы и счетчики, полупроводниковые (кремниевые, германиевые, другие материалы), детекторы на основе алмаза, приемники рентгеновского излучения на основе фотодиодов.

Газонаполненные детекторы имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объеме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон-ион в газе велика (30-40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение. Значительно более удобными в этом плане являются детекторы с твердотельной рабочей средой.

Полупроводниковые детекторы имеют ряд преимуществ по сравнению с газоразрядными приборами. Большая плотность полупроводника увеличивает потери энергии детектируемой частицей, что увеличивает диапазон регистрируемых энергий. Меньшая энергия ионизации полупроводника улучшает энергетическое разрешение. Высокая подвижность носителей заряда улучшает временное разрешение.

Недостатки полупроводникового детектора: малая эффективность при регистрации  $\gamma$ -квантов больших энергии; ухудшение разрешающей способности при нагрузках  $> 10^4$  частиц в сек; конечное время жизни полупроводникового детектора при высоких дозах облучения из-за накопления радиационных дефектов. Малость размеров доступных монокристаллов (диаметр  $\sim 3$  см, объем  $\sim 100$  см<sup>3</sup>) ограничивает применение полупроводникового в ряде областей. Кремний обычно применяется не в чистом виде, а в виде поверхностно-барьерных детекторов, применяются и детекторы с диффузионным переходом, но кремниевые ионно-имплантированные детекторы обладают большей стойкостью к внешним воздействиям и высокой стабильностью параметров.

Конечное устройство будет представлять собой детектор гамма-излучения. Когда гамма-излучение (длина волны менее 10 мкм.) попадает в область истощения на PIN-фотодиоде, оно производит небольшой заряд (эффект Комптона – некогерентное рассеяние фотонов на свободных электронах, некогерентность означает, что фотоны до и после рассеяния не интерферируют; эффект сопровождается изменением частоты фотонов, часть энергии которых после рассеяния передается электронам.). Формирование электронной пары требует не менее 1.022 МэВ, для Si значение составляет 3.65 эВ. Когда атом Si получает 3.65 эВ, то Si выделяет электрон. Для получения максимальной чувствительности необходимо использовать дополнительные цепи нормирования (рис. 2).

В схеме PIN-диод работает при обратном смещении, а наличие излучения определяется по сверхмалым изменениям обратного тока. К сожалению, кроме полезного сигнала, диод имеет темновой ток, который нужно компенсировать. Кроме того, величина детектируемого изменения тока очень

мала, а сопротивление диода достаточно велико (десятки МОм). В итоге для получения качественного КИП необходимо применить двухкаскадную схему со следующими жесткими ограничениями:

- ✓ выбирать усилители с большим входным сопротивлением, минимальным током смещения, малым температурным дрейфом, низким уровнем шумов.
- ✓ обеспечивать максимальное соответствие входных сопротивлений в первом звене усилителя, чтобы минимизировать температурную погрешность при изменении тока смещения усилителя.
- ✓ обеспечить конструктивную минимизацию токов утечки за счет правильной разводки и использования конденсаторов и резисторов с малыми утечками и т. д.

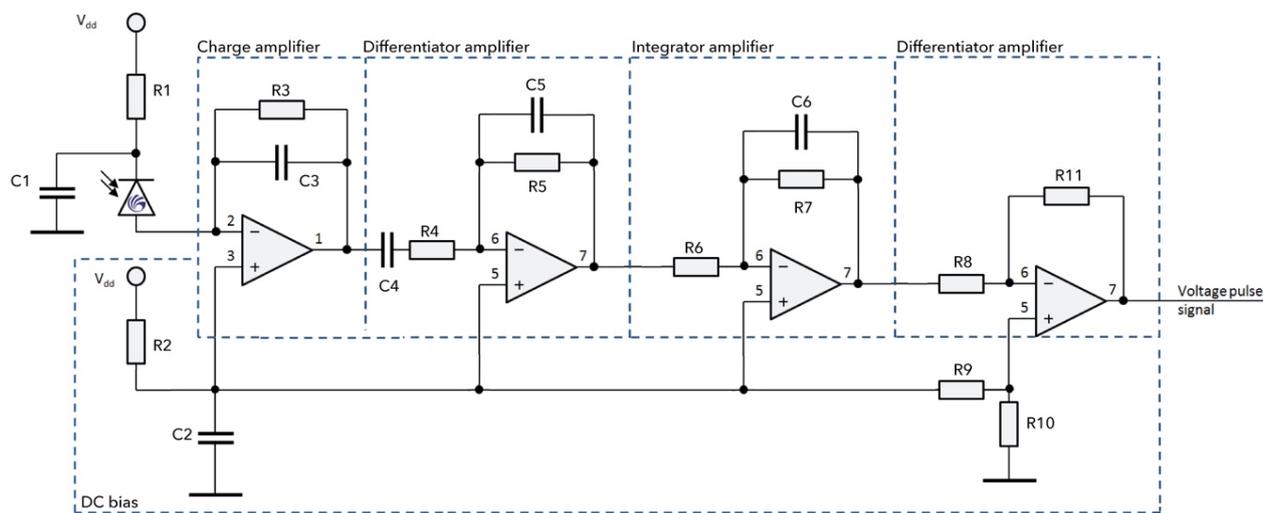


Рис. 1. Принципиальная схема прототипа КИП

### Библиографические ссылки

1. Malygin D.V. *The multi-purpose block-modular platform "Synergy" for the assembly of nanosatellites*. 2018 Journal of Instrument Engineering. 8 179-184.
2. Philonin O. V., Nasonov K. S. *Miniature multi-wire detector for nanosatellites*. Journal of Instrument Engineering. 2019. Vol. 62, N 5. P. 492–498.

### References

1. Malygin D.V. *The multi-purpose block-modular platform "Synergy" for the assembly of nanosatellites*. 2018 Journal of Instrument Engineering. 8 179-184.
2. Philonin O. V., Nasonov K. S. *Miniature multi-wire detector for nanosatellites*. Journal of Instrument Engineering. 2019. Vol. 62, N 5. P. 492–498.

© Малыгин Д. В., 2022

УДК 629.78

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА RESHUCUBE-1<sup>1</sup>

В. И. Учеватов

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

*В работе представлено устройство наноспутника ReshUCube-1, рассмотрены аспекты теплового режима. Приведен план реализации космических экспериментов.*

*Ключевые слова: наноспутник, температурные датчики, космические эксперименты.*

## RESEARCH OF THERMAL MODE AND SETTING EXPERIMENTS OF RESHUCUBE-1 SPACECRAFT

V. I. Uchevatov

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

*The article presents the structure of ReshUCube-1 nanosatellite and considers the aspects of thermal mode. The work contains the implementation plan of space experiments.*

*Keywords: nanosatellite, temperature transducers, space experiments.*

Тепловой режим является важным аспектом эксплуатации спутников, поскольку термическое воздействие может негативно повлиять на работу его внутренних систем. При перегреве аккумуляторов они начинают терять свою емкость и могут полностью выйти из строя, что приведет к полной неспособности аппарата, и, следовательно, миссии в целом. Также высокая температура может повлиять на работу внешних устройств, которые могут функционировать неправильно, а датчики выдавать неверные значения [1].

9 августа 2022 года с космодрома «Байконур» был запущен наноспутник ReshUCube-1, разработанный научно-производственной лабораторией «Малые космические аппараты» при Сибирском государственном университете имени М. Ф. Решетнева. Его задачами являются изучение магнитосферы и радиационной обстановки на орбите, изучение влияния атмосферы на орбиту космического аппарата (КА), мониторинг земной поверхности камерой оптического диапазона, изучение влияния космических условий на электронные компоненты и изучение работы отечественных процессоров космического назначения [2].

Устройство спутника состоит из служебной платформы, которая обеспечивает электропитание, ориентацию и радиосвязь, а также обеспечивает подачей команд на различные системы, и полезной нагрузки, где расположено все экспериментальное оборудование. Спутник оснащен большим количеством датчиков температуры, которые позволяют производить измерения на всем аппарате. Датчики, представленные в платформе, располагаются внутри служебных систем и на платах. В используемой нами платформе SXC3 они находятся в следующих модулях: на плате аккумуляторных батарей

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инноваций в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) 5-ой очереди. Проект «Космическая миссия ReshUCube», договор № 43С2/МОЛ/66974 от 13.04.2021.

(АКБ), на плате приемопередатчика УКВ-диапазона, в микросхеме датчиков угловой скорости и магнетометров, в солнечных датчиках и внутри блока маховиков [3].

Полезная нагрузка (ПН) космического аппарата содержит в себе 39 контактных датчиков температуры и 15 бесконтактных инфракрасных. Контактные датчики установлены на всех 10 печатных платах, 3 бесконтактных датчика закреплены на торцевой плате соосно камере оптического диапазона, а остальные располагаются на платах и направлены на солнечные панели.

Такой широкий набор датчиков позволяет проводить более подробный анализ термического состояния спутника и следить за его перегревом или переохлаждением. Также с помощью датчиков можно реализовать различные эксперименты по измерению распределения тепла на КА.

Во время эксплуатации в космосе спутник, посредством излучения, нагревается от внешних источников (излучения Солнца и Земли) и в большей мере от работы внутренних источников тепла (различные системы, приборы и средства связи). Для контроля над состоянием АКБ в системе электропитания (СЭП) предусмотрены нагревательные элементы, которые автоматически включаются, когда температура опускается до отметки ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ , и отключаются, при нагреве до  $+20^{\circ}\text{C}$ , тем самым предотвращая переохлаждение и перегрев АКБ. В других системах подобные нагреватели не присутствуют, поэтому нивелировать теплообмен необходимо вручную. СЭП и система радиосвязи работают и излучают тепло в постоянном режиме, и для нормальной работы КА предположительно требуется не использовать одновременно несколько устройств. В ПН присутствуют 4 платы с процессорами, которые в момент включения будут активно нагреваться, поэтому во время проведения экспериментов некоторые платы будут отключаться, чтобы избежать добавочных температурных возмущений [4].

В период эксплуатации планируется реализация разработанных экспериментов. Первые эксперименты будут представлять собой измерение температуры датчиками в период прохода спутником освещенной и теневой стороны орбиты. Последующие, более сложные эксперименты, планируются проводиться с включением других систем, которые в свою очередь излучают тепло. На основе полученных показаний будет проведен анализ того, как различные системы влияют на тепловой режим КА. Исходя из этого, будет организована работа определенных систем для нагрева аппарата, чтобы он не достиг экстремально низких температур, которые могут отрицательно сказаться на функционировании спутниковых систем.

Получение телеметрии со всех датчиков спутника осуществляется посредством сигналов радиомаяка. Данные с датчиков температуры, встроенных в платформу, входят в пакеты телеметрии различных устройств и передаются на наземную станцию путем отправки определенных команд. Для запроса данных полезной нагрузки необходимо отправить команды на адреса требуемых термодатчиков.

Показания приходят на наземную станцию в виде определенного фрейма данных [5]. На Земле все собранные данные будут обрабатываться с привлечением школьников и студентов.

В данных тезисах были рассмотрены тепловые проблемы, возникающие при эксплуатации спутника в космосе. Предложены варианты их решения, которые впоследствии предстоит испытать. Разработана методика экспериментов с использованием датчиков температуры, которые в ближайшем времени будут испытаны на аппарате.

### Библиографические ссылки

1. Введение в конструирование космических аппаратов : учебное пособие / С. Г. Ивахненко, А. В. Семенкин, Л. Г. Барсегян. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 157 с.
2. Концепция реконфигурируемой космической лаборатории на примере космического аппарата «ReshUCube» / Д. М. Зуев, А. В. Шахматов, В. Х. Ханов // Международная конференция «Космические системы». 27 апреля 2021 года. Москва. Тезисы. М.: Издательство «Перо», 2021. С. 17-18.
3. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учебное пособие / А. В. Туманов, В. В. Зеленцов, Г. А. Щеглов Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 572 с.
4. Теплообмен в космосе / С.В. Цаплин, С.А. Болычев, А.Е. Романов Самара: Изд-во «Самарский университет», 2013. 53 с.
5. Система визуализации данных телеметрии спутника BSUSAT-1 в режиме реального времени / В. В. Ратомский, Д. В. Бобров, П. В. Петров, Н. Н. Кольчевский // Квантовая электроника : Материа-

лы XIII Международной научно-технической конференции, Минск, 22–26 ноября 2021 года / Минск: Белорусский государственный университет, 2021. С. 419-420.

### References

1. Ivakhnenko S. G., Semenkin A. V., Barsegyan L. G. *Vvedenie v konstruirovaniye kosmicheskikh apparatov* [Introduction to spacecraft design]. Moscow, The Bauman University Publishing House, 2019. 157 p.
2. Zuev D. M., Shakhmatov A. V., Khanov V. Kh. [The concept of a reconfigurable space-born laboratory on the example of “ReshUCube” satellite]. International Conference “Space Systems” (AviaSpace-2021). 27 April 2021. Moscow. Abstracts. Publishing house “Pero”, 2021, p. 17-18.
3. Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Scheglov G. A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft On-board Equipment Configuration]. Moscow, The Bauman University Publishing House, 2015. 223 p.
4. Tsaplin S. V., Bolychev S. A., Romanov A. E. *Teploobmen v kosmose* [Heat exchange in space]. Samara, SSU Publ., 2013, 53 p.
5. Ratomsky V. V., Bobrov D. V., Petrov P. V., Kolchevsky N. N. [System for visualization of real-time telemetry data from BSUSAT-1 satellite]. *Materialy XIII Mezhdunar. nauch. konf.* [Materials XIII Intern. Scientific. Conf]. Minsk, 2021, p. 419-420. (In Russ.)

© Учеватов В. И., 2022

УДК 004.728

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ RESHUCUBE-1\*

В. Х. Ханов\*, Д. М. Зуев, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарёв, Е. С. Лепешкина

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

\*E-mail: hanov@sibsau.ru

*Представлены первые результаты работы наноспутника ReshUCube, находящегося на низкой околоземной орбите с 9 августа 2022г. Первые телеметрические сеансы показали хорошее состояние всех систем наноспутника.*

*Ключевые слова: наноспутники, телеметрия, состояние бортовых систем.*

## PRELIMINARY RESULTS OF THE RESHUCUBE-1 SPACE MISSION

V. Kh. Khanov\*, D. M. Zuev, A. V. Shakhmatov, S. A. Chekmarev, E. S. Lepeshkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: hanov@sibsau.ru

*The first results of the operation of the nanosatellite ReshUCube, which has been in low Earth orbit for only a few months, are presented. The first telemetry sessions showed the good condition of all nanosatellite systems.*

*Keywords: nanosatellites, telemetry, onboard system condition.*

Наноспутник [1], принадлежащий СибГУ им. М.Ф. Решетнева, был запущен попутным грузом при запуске КА «Хайям» (Иран) в числе других 16 наноспутников класса CubeSat ракетой Союз 2.1б [1]. ReshUCube-1 является космическим аппаратом формата CubeSat 3U, разработанным Сибирским государственным университетом науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (СибГУ) в рамках программы «Дежурный по планете» (Space Pi) Фонда Содействия Инновациям [2].

Основная цель ReshUCube-1 – вовлечение школьников и студентов в космическую и научно-исследовательскую деятельность.

В качестве дополнительных целей: проведение экспериментов с перспективными образцами отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ), летное тестирование разработанных радиационно-защитных экранов [3].

Космический аппарат выполнен в формате CubeSat 3U (340.5x100x100 мм, 3.41 кг) на базе спутниковой платформы производства ООО «СПУТНИКС» [4], полезная нагрузка «Реконфигурируемая космическая лаборатория» разработана и изготовлена в СибГУ. Облик аппарата представлен на рис 1.

Оборудование полезной нагрузки позволит проводить: изучение магнитосферы и радиационной обстановки на орбите; изучение влияния атмосферы на орбиту космического аппарата; мониторинга земной поверхности камерой оптического диапазона; изучение температурных режимов спутника; изучение влияние космических условий на электронные компоненты; изучение работы перспективных образцов отечественной ЭКБ в условиях космического полета.

---

\* 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.

По истечении приблизительно 3 ч. после запуска система телеметрии транспортно-пускового контейнера (производитель «Аэроспейс-Кэпитал», Россия) оповестила об успешном выходе ReshuCube-1 в космическое пространство.

В течении первых суток были получены, а затем и уточнены орбитальные элементы (TLE) орбитального движения ReshuCube-1, что позволило определить время пролета наноспутника над наземной станцией Центра управления полетами (ЦУП) СибГУ и провести 10.08.22 в СибГУ первый прием телеметрического маяка о состоянии систем наноспутника, находящегося после запуска в безопасном режиме. Принятая информация была штатно дешифрована, получены данные о состоянии и параметров включенных систем наноспутника. Информация показала, что первоначальное включение наноспутника прошло штатно, параметры платформы в норме. Дальнейшие сеансы приема маяка подтвердили нормальную работу систем ReshuCube-1 в безопасном режиме (рис. 2).



Рис. 1. Космический аппарат ReshuCube-1



Рис. 2. Тестовый снимок поверхности Земли, сделанный камерой КА ReshuCube-1. Размер кадра около 200x150 км. Центр полученного кадра находится по координатам 54.548° с.ш., 59.451° в.д.

В дальнейшем в течении 3-х недель работы по проверке систем и оборудования ЦУП проводились специалистами компании «Спутникс», Россия, которая является производителем платформы наноспутника. 2 сентября «Спутникс» закончил испытания платформы, документально подтвердил работоспособность систем (в том числе предоставил снимок поверхности Земли, произведенный камерой видимого диапазона (рис. 2), выдал параметры их состояния, и передал (разрешил) СибГУ право эксплуатации.

Первый пробный сеанс управления был проведен в СибГУ 9 сентября. Он заключался в посылке команды запроса на получение расширенной информации о состоянии наноспутника. Полученный телеметрический ответ на расширенный запрос был принят. Таким образом, была подтверждена готовность наземной станции ЦУП к самостоятельной полной эксплуатации (посылка команд – получение телеметрических ответов) наноспутника ReshUCube.

В настоящее время проводится последовательная работа по освоению специалистами СибГУ процедур эксплуатации бортового оборудования платформы и полезной нагрузки наноспутника ReshUCube-1, таким образом, осуществлен переход в режим опытной эксплуатации.

### Библиографические ссылки

1. ReshUCube-1 [Электронный ресурс]. URL: <https://reshucube.ru> (дата обращения: 05.09.2022).
2. Россия вывела на орбиту иранский спутник дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20220809/sputnik-1808239841.html> (дата обращения: 05.09.2022).
3. Научно-образовательный проект Space-π [Электронный ресурс]. URL: [https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi\\_август.pdf](https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi_август.pdf) (дата обращения: 05.09.2022).
4. Ханов В.Х., Зуев Д.М., Шахматов А.В. Реализации полезной нагрузки наноспутника ReshUCube как реконфигурируемой космической лаборатории. В материалах РЧ-21, т.1, с.418-419.
5. Спутникс. Приборы CubeSat [Электронный ресурс]. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat> (дата обращения: 05.09.2022).

### References

1. *ReshUCube-1* (In Russ.) Available at: <https://reshucube.ru> (accessed: 05.09.2022).
2. *Rossiya vyvela na orbitu iranskiy sputnik distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (In Russ.) Available at: <https://ria.ru/20220809/sputnik-1808239841.html> (accessed: 05.09.2022).
3. *Nauchno-obrazovatel'nyy proyekt Space-π* (In Russ.) Available at: [https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi\\_август.pdf](https://fasie.ru/upload/docs/SPACE-Pi_август.pdf) (accessed: 05.09.2022).
4. Khanov V.KH., Zuev D. M., Shakhmatov A.V. *Realizatsii poleznoy nagruzki nanosputnika ReshUCube kak rekonfiguriruyemoy kosmicheskoy laboratorii*. [Proc. of "Reshetnev Readings"], 2021, vol. 1, pp. 418-419.
5. *Pribory CubeSat* [Sputniks] (In Russ.) Available at: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat> (accessed: 05.09.2022).

© Ханов В. Х., Зуев Д. М., Шахматов А. В., Чекмарёв С. А., Лепешкина Е. С., 2022



**Секция**

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

УДК 004.67

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГИПЕРПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ RANDOM FOREST ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ БИОМАССЫ

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

*Описывается алгоритм подбора оптимальных гиперпараметров модели машинного обучения Random Forest, применимой в работах по анализу данных дистанционного зондирования.*

*Ключевые слова: Random Forest, гиперпараметры, оптимизация.*

## OPTIMIZING RANDOM FOREST MODEL HYPERPARAMETERS FOR BIOMASS ESTIMATION ALGORITHM TRAINING

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

*The algorithm for selecting the optimal hyperparameters of the Random Forest machine learning model, applicable in the analysis of remote sensing data, is described.*

*Keywords: Random Forest, hyperparameters, optimization.*

Во многих исследованиях применяется непараметрическая модель машинного обучения случайный лес (Random Forest) [1, 2], в том числе для оценки надземной биомассы по данным дистанционного зондирования. Отмечается высокая эффективность данной модели. Будем рассматривать версию Random Forest для оценки регрессии. Регрессия случайного леса – это алгоритм обучения с учителем, который использует метод ансамблевого обучения для регрессии. Метод ансамблевого обучения – это метод, который объединяет прогнозы нескольких алгоритмов машинного обучения, чтобы сделать прогноз более точным, чем одна модель.

В основе метода лежит построение ансамбля деревьев решений, число которых является первым параметром модели. Каждое из этих деревьев строится на основе подвыборки, взятой из исходной обучающей выборки с помощью бутстрепа. В Random Forest при построении деревьев на стадиях расщепления вершин используется фиксированное число случайно отбираемых признаков из обучающей выборки, которое является вторым параметром модели. Оценка регрессии осуществляется с помощью усреднения оценок регрессии всех деревьев.

На точность обучения модели Random Forest влияет множество факторов, в том числе и настройка гиперпараметров [3]. В задачах дистанционного зондирования от моделей классификации и регрессии зачастую требуется наилучшая точность, что делает каждый фактор, влияющий на точность модели особенно значимым. В случае поиска оптимальных параметров вручную, проверка не всех комбинаций гиперпараметров может привести к потере точности.

Для более глубокой настройки модели используются гиперпараметры. В различных реализациях Random Forest гиперпараметры установлены по умолчанию, но не гарантируют лучшего результата. Оптимальные гиперпараметры различны для каждого набора данных, поэтому как для повышения качества регрессии по сравнению с заданными по умолчанию гиперпараметрами, так и для повышения эффективности модели при изменении набора данных следует производить их перенастройку.

Во избежание переобучения модели следует использовать перекрёстную проверку, которая обычно уже включена в инструментальный пакетов с Random Forest. В данном случае, нас интересует наи-

лучшая результативность модели. Самым простым решением является простой перебор всех возможных значений гиперпараметров с выбором наилучшего результата. Рассмотрим это подробнее.

Для начала необходимо реализовать сетку для выполнения перекрёстной проверки K-Fold Cross Validation [4, 5] и выбрать количество циклов повторения обучения, например,  $K = 7$ . Произвести выбор  $n$  гиперпараметров, которые необходимо оптимизировать. Далее, задать шаги повышения значений  $F_n$  для числовых гиперпараметров, а для настраиваемых иными символами – создать готовые шаблоны. Начинать оптимизацию следует с минимальных значений.

1. Выполнить обучение модели и проверить её точность на минимальных значениях гиперпараметров.

2. Выполнить поиск максимальных значений каждого из гиперпараметров: если  $n$ -й гиперпараметр не имеет верхнего порога значений, необходимо увеличить его на  $F_n$  и проверить точность модели при установленных на минимум остальных гиперпараметров. Повторять, пока точность не начнёт снижаться, либо прирост точности будет ничтожно мал. Выбрать максимальное значение  $n$ -го гиперпараметра как верхнюю границу. Количество всех возможных значений каждого гиперпараметра возьмём равным  $r_n$ . Зафиксировать точность равной нулю.

3. Начиная с последнего гиперпараметра  $n$  осуществить обучение по  $r_1, \dots, r_n$  значениям гиперпараметра, проверить точность каждого результата и зафиксировать наибольшую.

4. Если встречается гиперпараметр с установленной нами верхней границей, после перебора всех значений следует увеличить его верхнюю границу на  $F_n$ , осуществить обучение, проверить точность результата и, в случае роста точности, зафиксировать её и повторить пункт 4.

5. Повторить пункты 3, 4 для всех гиперпараметров, начиная с  $n-1$  до 1.

Предложенный алгоритм является простым для понимания и применения. Однако, в некоторых случаях, выполнение алгоритма может занять неприемлемое количество времени. В таких ситуациях применимы алгоритмы, не требующие полного перебора всех значений гиперпараметров.

Данный алгоритм позволяет в автоматизированном режиме выявить наилучшие значения гиперпараметров модели Random Forest в задачах оценивания биомассы по данным дистанционного зондирования, что сказывается на повышении точности результатов.

#### Библиографические ссылки

1. Breiman L. Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. P. 5–32.
2. Parmar, A.; Katariya, R.; Patel, V. A Review on Random Forest: An Ensemble Classifier. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things*, Coimbatore, India, 7–8 August 2018; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; P. 758–763.
3. A random forest regressor. Parameters. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (дата обращения: 03.09.2022).
4. Stone, M. Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. 1974. Vol. 36. P. 111–147.
5. Stone, M. An Asymptotic Equivalence of Choice of Model by Cross-Validation and Akaike's Criterion // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. 1977. Vol. 39. P. 44–47.

#### References

1. Breiman L. Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. P. 5–32.
2. Parmar, A.; Katariya, R.; Patel, V. A Review on Random Forest: An Ensemble Classifier. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things*, Coimbatore, India, 7–8 August 2018; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; P. 758–763.
3. A random forest regressor. Parameters. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (дата обращения: 03.09.2022).
4. Stone, M. Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. 1974. Vol. 36. P. 111–147.
5. Stone, M. An Asymptotic Equivalence of Choice of Model by Cross-Validation and Akaike's Criterion // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. 1977. Vol. 39. P. 44–47.

УДК 004.021

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПРИВЯЗКА СОНОГРАММ ГИДРОЛОКАТОРА STARFISH

И. А. Бабий, А. Е. Гончаров

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

*Современное качество сонограмм гидролокатора бокового обзора (ГБО) позволяет использовать их в картировании территорий, создании тематических и общих карт, проводить анализ данных на основе полученной информации. Для этого необходимо совместное использование всех необходимых данных, для чего требуется преобразовать сонограмму в нужный формат, а также задать ей пространственную привязку.*

*Ключевые слова: гидролокатор бокового обзора, пространственная привязка, картирование дна, сонограмма.*

## GEOREFERENCING SONOGRAM SONAR STARFISH

I. A. Babiy, A. E. Goncharov

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

*The modern quality of sidescan sonar (SSS) sonograms allows for their application in mapping territories, building thematic and general maps, and analyzing data based on gathered information. These procedures require sharing all the data, which requires converting sonograms into the desired format and georeferencing them.*

*Keywords: sidescan sonar, georeferencing, bottom mapping, sonogram.*

Часто встречающиеся методы пространственной привязки изображений подходят для общих случаев – например, когда необходимо произвести привязку сканированных топографических карт, в результате которой получится трансформированное изображение с координатами – его можно перевести в цифровой вид и использовать в геоинформационных системах (ГИС) для анализа территории [1].

Однако, в открытом доступе на данный момент не было найдено материалов о том, как выполнять пространственную привязку изображений, количество строк и столбцов пикселей которых отличается на тысячи единиц – изображение является узким, но длинным. Ярким примером такого изображения является сонограмма гидролокатора бокового обзора «Starfish 990F» компании «Tritech». В случае необходимости объединения данных ГБО с данными дистанционного зондирования, картографии или других материалов, требуется провести преобразование сонограммы из внутреннего формата файлов «Starfish» в пригодный для использования формат в определённом программном продукте, например, в ArcGIS [2, 3].

В процессе такого преобразования необходимо получить промежуточный файл формата CSV путём экспорта из программного обеспечения «Starfish», в котором хранятся не только значения пикселей, но и координаты, записанные на GPS-приёмник. При помощи простого цикла в Python, можно из данного CSV файла записать в текстовый документ как реальные, так и условные координаты преобразуемого изображения, введённые для удобства. Условным координатам задаётся система координат та же, что и у преобразуемого изображения – WGS84 (см. рисунок).

Стоит отметить, что преобразуемое изображение изначально имеет нужную проекцию WGS84, но для удобства записи координат в файл, его верхний левый пиксель в ещё не привязанном к местности состоянии имеет координаты  $50.00^\circ$  восточной долготы,  $50.00^\circ$  северной широты.

```
50.0001 49.9999999 87.5872266789277 66.3770937892534
50.0001 49.9999951 87.5872316789278 66.3770921225846
50.0001 49.9999916 87.5872383455946 66.3770921225816
50.0001 49.9999866 87.5872433455947 66.3770904559128
50.0001 49.999985 87.5872483455948 66.377088789244
50.0001 49.9999816 87.5872533455949 66.3770887892418
50.0001 49.9999783 87.5872583455951 66.377087122573
50.0001 49.9999749 87.5872633455952 66.3770871225708
50.0001 49.99997 87.5872683455953 66.3770854559019
50.0001 49.9999683 87.5872733455954 66.3770837892331
50.0001 49.9999649 87.5872783455955 66.377083789231
50.0001 49.9999615 87.5872833455956 66.3770821225621
50.0001 49.9999582 87.5872883455957 66.3770821225599
50.0001 49.9999532 87.5872933455958 66.3770804558911
50.0001 49.9999515 87.5872983455959 66.3770804558889
50.0001 49.9999482 87.5873016789293 66.3770787892208
50.0001 49.9999448 87.5873066789294 66.3770787892186
50.0001 49.9999415 87.5873116789295 66.3770771225498
50.0001 49.9999364 87.5873166789296 66.3770771225476
50.0001 49.9999348 87.5873216789297 66.3770754558788
50.0001 49.9999314 87.5873266789299 66.3770737892099
```

#### Пример записанных координат

Так как ширина полосы охвата ГБО равна 40 метрам, а приёмник располагается в её центре и фиксирует координаты раз в несколько секунд, возникает проблема, что все имеющиеся координаты лежат на одной линии – в центре сонограммы [4]. Это означает, что при загрузке файла с координатами для преобразования в таблицу связей, которая находится на панели инструментов «Пространственная привязка», и попытке выполнения преобразования, появляется предупреждение: «Контрольные точки коллинеарны или плохо распределены. Это повлияет на результат деформации.

Такое предупреждение появляется из-за того, что стандартные алгоритмы привязки направлены на равномерное распределение связей по всему изображению, а не на концентрацию их в одном месте [5] – в данном случае, на одной линии. Другими словами, стандартные алгоритмы не смогут рассчитать математическую модель, так как по координате X, по которой нет изменений значений координат, будет неизвестный масштаб. В данном случае, необходима хотя бы одна точка с отличной от других координатой по X. В результате выполнения преобразования, привязка выполняется некорректно всеми доступными в ArcGIS методами трансформации – появляются сильные искажения.

Таким образом, точки привязки придётся расположить по всей площади изображения, чтобы была возможность рассчитать масштаб по X. Для этого надо вычислить дополнительные точки, которые будут хранить свои координаты также, как уже имеющиеся по центру сонограммы точки.

Дополнительные координаты необходимо вычислять по следующей схеме: должны быть получены координаты для каждой точки, которая находится на удалении 20 метров перпендикулярно направлению движения судна в каждую сторону от уже имеющихся в центре сонограммы координатных точек. Для первой и последней точки центральной линии дополнительные точки вычислять не нужно.

Итак, опишем алгоритм. Необходимо создать цикл, в котором последовательно будут перебираться по три точки, начиная с первой, увеличивая шаг на 1. Выбранные три точки образуют угол, с вершиной во второй из трёх точек. Требуется вычислить биссектрису как тупого, так и острого угла. Далее, на ней надо отложить отрезок, с началом в вершине угла, длиной 20 метров в заданной системе координат изображения. Координаты второго, вычисленного конца отрезка и будут искомым точкой. Её нужно добавить в файл с координатами, добавив и условные координаты изображения, которые вычисляются исходя из размера пикселя.

Полученный файл координат можно загрузить в таблицу связей, находящуюся на панели инструментов «Пространственная привязка». Так как точек привязки много, нужно использовать метод трансформации, который сможет трансформировать изображение с минимумом искажений, например, метод сплайна.

В итоге, сонограмма, преобразованная в формат GeoTiff, получает пространственную привязку и может полноценно использоваться совместно с другими обрабатываемыми материалами. Однако, требуется учесть, что GPS-приёмник находится на судне, а не на самом ГБО, что даёт погрешность при определении координат, которую, при необходимости, можно скорректировать.

### Библиографические ссылки

1. Черепанова Е.С., Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформатика: основы работы с географическими пространственными данными: уч. пособие / Е.С. Черепанова, С.В. Пьянков, А.Н. Шихов ; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. 94 с.: ил.
2. Бабий И.А., Гончаров А.Е. Методика получения изображений в формате GeoTiff по данным табличного формата файла CSV на примере сонограммы гидролокатора бокового обзора / И.А. Бабий, А.Е. Гончаров // Вопросы подводной археологии. 2020. №11. С. 4-10
3. Бабий И.А., Галимзянов О.А., Гончаров А.Е. Обработка изображений с гидролокатора бокового обзора на примере одного участка нижнего течения реки Енисей. / И.А. Бабий, О.А. Галимзянов, А.Е. Гончаров // Российская Арктика. 2020. №11. С.16
4. Volkov D.A., Gorodov A.A., Goncharov A.E., Shepeta N.A., Bashmur K.A. Software for tracking aquatic environment geographic information systems for further integration with advanced search capabilities // Journal of Physics: Conference Series. 2020. N 1582. DOI 10.1088/1742-6596/1582/1/012089
5. Основы пространственной привязки набора растровых данных [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm> (дата обращения: 28.08.2022).

### References

1. Cherepanova E.S., P'yankov S.V., Shihov A.N. [Geoinformatics: the basics of working with geographic data: a tutorial] / Perm. gos. nac. issled. un-t. Perm'. 2017. 94 p. (In Russ.)
2. Babiy I.A., Goncharov A.E. [Technique for obtaining images in GeoTiff format from the data of the tabular CSV file format using the example of a side-scan sonar sonogram]. *Voprosy podvodnoj arheologii*. 2020. Vol. 11. P. 4-10. (In Russ.)
3. Babiy I.A., Galimzyanov O.A., Goncharov A.E. [VISUALIZING AND PROCESSING SIDE-SCAN SONAR IMAGES: A CASE OF THE LOWER REACHES OF THE ENISEI RIVER]. *Rossiyskaya Arktika*. 2020. Vol. 11. P. 16-23. (In Russ.)
4. Volkov D.A., Gorodov A.A., Goncharov A.E., Shepeta N.A., Bashmur K.A. Software for tracking aquatic environment geographic information systems for further integration with advanced search capabilities // Journal of Physics: Conference Series. 2020. N 1582. DOI 10.1088/1742-6596/1582/1/012089
5. *Basics of spatially referencing a raster dataset*. (In Russ.). Available at: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm> (accessed 28.08.2022).

© Бабий И. А., Гончаров А. Е., 2022

УДК 519.7

## АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ О НЕЗАВИСИМОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

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

*Приводится сравнение новой методики проверки гипотезы о независимости случайных величин, основанной на непараметрическом алгоритме распознавания образов с традиционным критерием Пирсона. Определяются условия их компетентности.*

*Ключевые слова: проверка гипотезы о независимости случайных величин, непараметрический алгоритм распознавания образов, ядерная оценка плотности вероятности.*

## ANALYSIS OF METHODS FOR TESTING THE HYPOTHESIS OF THE INDEPENDENCE OF RANDOM VARIABLES

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

*A comparison of a new method for testing the hypothesis of the independence of random variables based on a nonparametric pattern recognition algorithm with the traditional Pearson criterion is presented. The conditions of their competence are determined.*

*Keywords: hypothesis testing of the independence of random variables, nonparametric pattern recognition algorithm, kernel probability density estimation.*

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, 3] 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 [4-13].

В работе проводится сравнение эффективности предлагаемой методики проверки гипотезы о независимости случайных величин с традиционным критерием Пирсона при анализе статистических данных.

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  $x_1, x_2$ . Поэтому методика проверки гипотезы о независимости случайных величин предполагает выполнение следующих действий:

1. Осуществить синтез непараметрического алгоритма распознавания образов  $m(x)$ , соответствующего критерию максимального правдоподобия, для классов  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .

2. Определить оценки вероятностей  $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2$  ошибок распознавания классов  $\Omega_1, \Omega_2$  решающего правила  $m(x)$  по обучающей выборке  $V = (x^i, \delta(i), i = \overline{1, n})$  при оптимальных коэффициентах размытости ядерных статистик  $\bar{p}(x_1), \bar{p}(x_2), \bar{p}(x_1, x_2)$ .

Значения  $\bar{\rho}_t$  вычисляются в режиме «скользящего экзамена» по выборке  $V$  в предположении, что её элементы принадлежат классу  $\Omega_t$ ,

$$\bar{\rho}_t = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1(\delta(j), \bar{\delta}(j)), \quad t = 1, 2, \quad (1)$$

где  $\delta(j)$  – указания типа  $x^j = (x_1^j, x_2^j) \in \Omega_t$ , а  $\bar{\delta}(j)$  – «решение» алгоритма  $m(x)$  о принадлежности ситуации  $x^j$  к одному из классов  $\Omega_t, t = 1, 2$ .

При вычислении  $\bar{\rho}_t$  в соответствии с методикой «скользящего экзамена» ситуация  $x^j = (x_1^j, x_2^j)$  из выборки  $V$ , которая подаётся на контроль в алгоритм  $m(x)$ , исключается из процесса формирования непараметрических оценок плотностей вероятностей случайных величин в классах  $\Omega_1, \Omega_2$ .

Индикаторная функция в формуле (1) определяется выражением

$$1(\delta(j), \bar{\delta}(j)) = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta(j) = \bar{\delta}(j) \\ 1, & \text{если } \delta(j) \neq \bar{\delta}(j). \end{cases}$$

3. Сравнить значения  $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2$  в предположении, что элементы выборки  $V$  принадлежат классам  $\Omega_1, \Omega_2$  соответственно. Тогда гипотеза  $H_0$  справедлива, если  $\bar{\rho}_1 < \bar{\rho}_2$ . В противном случае при  $\bar{\rho}_2 < \bar{\rho}_1$  случайные величины  $x_1$  и  $x_2$  являются зависимыми.

При ограниченных объёмах  $n$  выборки  $V$  возникает задача доверительного оценивания вероятностей ошибок распознавания образов  $\rho_1, \rho_2$ . Для её решения используется традиционная методика проверки гипотезы о равенстве двух вероятностей  $\rho_1, \rho_2$  [1]. В качестве наблюдаемого значения критерия проверки гипотезы используется статистика

$$U = \frac{|\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2|}{\sqrt{\frac{\bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2}{2} \left(1 - \frac{\bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2}{2}\right) \frac{2}{n}}}$$

При уровне значимости 0,05 проверяемая гипотеза выполняется, если  $U < 1.96$ .

По результатам вычислительных экспериментов предлагаемая методика и критерий Пирсона при анализе неоднозначных зависимостей между случайными величинами при малых объёмах статистических данных и средних квадратических отклонений  $\sigma$  помех в основном сопоставимы и безошибочно определяют зависимость случайных величин. С увеличением объёма  $n$  исходных данных эффективность сравниваемых критериев проверки гипотезы о независимости случайных величин повышается.

Преимущество предлагаемой методики проверки гипотезы о независимости случайных величин наблюдается при малых значениях  $\sigma$  и ограниченных  $n$ , а также при больших  $n$  и малых значениях  $\sigma$ . При больших  $n$  и  $\sigma$  наиболее часто обнаруживается преимущество критерия Пирсона, если соблюдается процедура оптимальной дискретизации области значений двухмерной случайной величины.

### 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. Проверка гипотезы о независимости двумерных случайных величин с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // Автометрия. 2021. Т. 57, № 2. С. 41–48.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ непараметрических алгоритмов распознавания образов в условиях пропуска данных // Автометрия. 2008. Т. 44, №3. С. 65–74.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры семейства непараметрических решающих функций в задаче распознавания образов // Автометрия. 2011. Т. 47, №4. С. 76–82.
6. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений двухмерной случайной величины // Измерительная техника. 2016. №2. С. 14–17.
7. 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.
8. Лапко А. В., Лапко В. А., Егорочкин И. А. Непараметрические оценки смеси плотностей вероятности и их применение в задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т. 35, №1. С. 60–64.
9. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив непараметрических решающих функций в двухальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т. 37, №3-1. С. 156–160.
10. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая оценка уравнения разделяющей поверхности в условиях больших выборок и её свойства // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 39, №1-2. С. 300–304.
11. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры смеси непараметрических оценок плотности вероятности многомерной случайной величины // Системы управления и информационные технологии. 2011. Т. 43, №1. С. 12–15.
12. Лапко А. В., Лапко В. А. Свойства непараметрической оценки плотности вероятности многомерных случайных величин в условиях больших выборок // Информатика и системы управления. 2012. Т. 32, №2. С. 121–126.
13. Лапко В. А., Капустин А. Н. Синтез нелинейных непараметрических решающих правил в задачах распознавания образов // Автометрия. 2006. Т. 42, № 6. С. 26–33.

### 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. 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.
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Analysis of nonparametric pattern recognition algorithms under incomplete data. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, Vol. 44, No. 3, p. 238–244.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Synthesis of the structure of a family of nonparametric decision functions in the pattern recognition problem. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, Vol. 47, No. 4, p. 382–387.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable. *Measurement Techniques*, 2016, Vol. 59, No. 2, p. 122–126.

7. 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 (In Russ.)
8. Lapko A. V., Lapko V. A., Egorochkin I. A. [Nonparametric estimates of a mixture of probability densities and their application in the problem of pattern recognition]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2009, Vol. 35, No. 1, p. 60–64. (In Russ.)
9. Lapko A. V., Lapko V. A. [A collective of nonparametric solving functions in a two-alternative pattern recognition problem]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2009, Vol. 37, No. 3-1, p. 156–160. (In Russ.)
10. Lapko A. V., Lapko V. A. [Nonparametric estimation of the separating surface equation in conditions of large samples and its properties]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2010, Vol. 39, No. 1-2, p. 300–304. (In Russ.)
11. Lapko A. V., Lapko V. A. [Synthesis of the structure of a mixture of nonparametric estimates of the probability density of a multidimensional random variable]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2011, Vol. 43, No. 1, p. 12–15. (In Russ.)
12. Lapko A. V., Lapko V. A. [Properties of nonparametric estimation of the probability density of multidimensional random variables in conditions of large samples]. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2012, Vol. 32, No.2, p. 121–126. (In Russ.)
13. Лапко В. А., Капустин А. Н. [Synthesis of nonlinear nonparametric decision rules in pattern recognition problems]. *Avtometriya*, 2006, Vol. 42, No. 6, p. 26–33. (In Russ.)

© Бахтина А. В., 2022

УДК 004.932.2

## МЕТОДЫ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЫМА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ ПО ВИЗУАЛЬНЫМ ДАННЫМ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Р. Р. Беляев

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: radio.sortsind@yandex.ru

*В работе рассмотрены современные методики раннего обнаружения природных пожаров на основе нейронных сетей.*

*Ключевые слова: визуальные данные, нейронные сети, раннее обнаружение пожара.*

## METHODS FOR EARLY DETECTION OF SMOKE OF NATURAL FIRES BASED ON VISUAL DATA USING NEURAL NETWORKS

R. R. Belyaev

Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: radio.sortsind@yandex.ru

*This work considers modern methods of early detection of wildfires based on neural networks.*

*Keywords: visual data, neural networks, early fire detection.*

Лесные территории занимают значительную часть территории России. Здоровье леса имеет существенное значение с экономической, экологической и социальной точек зрения. Лесные пожары, возникающие вследствие деятельности человека или вследствие влияния природных факторов, наносят непоправимый ущерб здоровью леса, поэтому раннее обнаружение возгораний на лесных участках является важной задачей. Ранним признаком возгорания является обнаружения дыма, так как дым возникает раньше пламени.

Дым от лесных пожаров имеет характерные особенности, обуславливаемые химическим составом природного материала, сгорающего при пожаре. Так, этот дым на ранней стадии пожара светлый, медленно ползущий и его легко спутать с облаками (см. рисунок, *а*), при развитии пожара дым значительно теряет свою прозрачность, а скорость его движения увеличивается (см. рисунок, *б*). Визуальные признаки дыма существенно варьируются в зависимости от исходных данных: спутниковые снимки дистанционного зондирования Земли, инфракрасные камеры, вышки, БПЛА. Для мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае используется два технических решения: дроны и наземные вышки.

На лесной территории Красноярского края расположено около 150 вышек высотой 90 метров. Видеокамера, расположенная на такой вышке, медленно вращается по кругу и передает изображение в прямом эфире в диспетчерскую, где диспетчер наблюдает за видеороликами, радиус обзора такой вышки составляет 5 километров. При использовании дрона удастся облететь территорию, имеющую похожую на окружность форму, диаметром в 5 километров. Полученные с дрона данные анализируются диспетчером. Такой способ обнаружения дыма лесных пожаров требует значительной сосредоточенности от диспетчера и является крайне ресурсоемким, поэтому автоматизированное обнаружение дыма от лесных пожаров является актуальной задачей.

Для автоматизированного обнаружения лесных пожаров в работе [1] применяется составная нейронная сеть со смежными слоями, основанная на рекурсивной пирамиде признаков с обратной и расширенной сверткой и глобальным оптимальным немаксимальным подавлением (ARGNet), что позво-

ляет выполнить высокоточное обнаружение дыма от лесных пожаров. Во-первых, составная сеть смежного слоя предлагается для улучшения выделения признаков дыма с высокой прозрачностью и без четких краев. Затем предлагается пирамида рекурсивных признаков с деконволюцией и расширенной сверткой (RDDFPN) для объединения мелких визуальных признаков и глубокой семантической информации в измерении канала для повышения точности обнаружения дыма с воздуха на большом расстоянии. Наконец, глобальное оптимальное немаксимальное подавление (GO-NMS) устанавливает целевую функцию для глобальной оптимизации выбора опорных кадров для адаптации к аэрофотосъемке нескольких мест задымления в сценах лесных пожаров. Точность данного метода оценивается как 90.26 % при 122.5 FPS.



а

б

Дым от лесных пожаров:  
а – начало пожара; б – развитие пожара

Работа [2] представляет адаптивную линейную сеть повторного использования признаков для быстрого обнаружения дыма от лесных пожаров (ALFRNet). Во-первых, используется двойной линейный модуль повторного использования признаков (модуль DLFR), чтобы уменьшить потерю информации в процессе получения изображений дыма, а гибридный модуль, управляемый вниманием (модуль HAG), был предложен для уменьшения помех, вызванных размытым изображением. На сверточном уровне предлагаемой сети был использован новый модуль адаптивной глубокой свертки (модуль ADC), который может эффективно решить проблему сложности распознавания, вызванную слишком маленькими дымовыми целями на изображениях. Кроме того, мы используем Cluster NMS (CNMS), чтобы избежать больших отклонений поля обнаружения. Он может адаптироваться к дымовой цели с нечетким краем и повысить эффективность обнаружения. Точность данного метода оценивается как 87.26% при 43 FPS.

В работе [3] предлагается унифицированный подход к обнаружению пламени и дыма, называемый «UFS-Net», основанный на глубоком обучении. Эффективная и адаптированная архитектура сверточной нейронной сети предназначена для обнаружения пламени и дыма в видеокдрах. UFS-Net способна идентифицировать опасность пожара, классифицируя видеокдры по восьми классам: пламя, белый дым, черный дым, пламя и белый дым, пламя и черный дым, черный дым и белый дым, пламя, белый дым и черный дым, и отсутствие опасности.

Для дальнейшего повышения надежности UFS-Net применяется модуль принятия решений на основе схемы голосования. Ценность данной работы также состоит в том, что для обучения и оценки UFS-Net в открытом доступе представлен богатый аннотированный набор данных под названием «UFS-Data», который включает 849 640 изображений, собранных из различных источников данных, в том числе и полученных искусственно.

В данной статье были приведены разные современные подходы к обнаружению пламени и дыма. Составная сеть ARGNet показала лучшую точность распознавания, но при этом эта модель требует изображения высокого разрешения. Линейная сеть ALFRNet ненамного уступает ARGNet в точности, но при этом может работать с менее качественными изображениями. Сеть UFS-Net, основанная на глубоком обучении, имеет средние показатели, при этом способна классифицировать дым, что может быть полезно в некоторых задачах.

### **Библиографические ссылки**

1. Высокоточный подход к обнаружению дыма от лесных пожаров на основе ARGNet / Jialei Zhana, Yaowen Hua, Guoxiong Zhoua, Yanfeng Wangb, Weiwei Caia, LiuJun Lic. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169922001910>
2. Адаптивная линейная сеть повторного использования признаков для модели быстрого обнаружения дыма от лесных пожаров / Jiayong Lia, Guoxiong Zhoua, Aibin Chena, Yanfeng Wangb, Jianwu Jiangc, Yahui Hud, Chao Lua. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574954122000334>
3. UFS-Net: унифицированный метод обнаружения пламени и дыма для раннего обнаружения пожара в приложениях видеонаблюдения с использованием CNN / Ali Hosseiniab, Mahdi Hashemzadehab, Nacer Farajzadehab. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877750322000606>

### **References**

1. A high-precision forest fire smoke detection approach based on ARGNet / Jialei Zhana, Yaowen Hua, Guoxiong Zhoua, Yanfeng Wangb, Weiwei Caia, LiuJun Lic. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169922001910>
2. Adaptive linear feature-reuse network for rapid forest fire smoke detection model / Jiayong Lia, Guoxiong Zhoua, Aibin Chena, Yanfeng Wangb, Jianwu Jiangc, Yahui Hud, Chao Lua. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574954122000334>
3. UFS-Net: A unified flame and smoke detection method for early detection of fire in video surveillance applications using CNNs / Ali Hosseiniab, Mahdi Hashemzadehab, Nacer Farajzadehab. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877750322000606>

© Беляев Р. Р., 2022

УДК 630\*556.5\*528

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GOOGLE EARTH ENGINE ПРИ РАСЧЕТЕ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ПОДКАМЕННАЯ ТУНГУСКА\*

И. В. Данилова<sup>1,2</sup>, Т. А. Буренина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/28

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26к 1

\*E-mail: tiv80@mail.ru

*В работе оценивается возможность расчета эвапотранспирации на территории водосбора реки Подкаменная Тунгуска с помощью интерфейса облачной платформы Google Earth Engine.*

*Ключевые слова: Google Earth Engine, MOD16, эвапотранспирация, Подкаменная Тунгуска*

## USING THE GOOGLE EARTH ENGINE TO CALCULATE EVAPOTRANSPIRATION IN THE PODKAMENAYA TUNGUSKA RIVER BASIN

I. V. Danilova<sup>1,2</sup>, T. A. Burenina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sukachev Institute of Forest Siberian Branch Russian Academy of Sciences  
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
26k/1, Kirenskogo, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

\*E-mail: tiv80@mail.ru

*An assessment of the possibility of calculating evapotranspiration in the catchment area of the Podkamennaya Tunguska River was carried out using Google Earth Engine.*

*Key words: Google Earth Engine, MOD16, evapotranspiration, Podkamennaya Tunguska*

Использование облачных геоинформационных систем облегчает оперативный анализ пространственных данных. Сервис Google Earth Engine (GEE) является одним из наиболее известных и имеет огромное хранилище общедоступных наборов геопространственных данных: спутниковые изображения, сделанные в различных диапазонах электромагнитного спектра, модели прогноза погоды и параметры климата, тематические карты, различные параметры окружающей среды, топографические и социально-экономические наборы данных.

В своей работе мы использовали сервис GEE для вычисления эвапотранспирации, которая является неотъемлемой частью водного баланса рек и определяется множеством характеристик. Эвапотранспирация включает в себя транспирацию растительностью, испарение влаги с земной поверхности, а также испарение осадков, задержанных растительным покровом.

Цель нашей работы заключалась в вычислении эвапотранспирации для различных лесогидрологических комплексов для оценки их вклада в суммарное испарение на водосборе.

Исследования проводились на территории Красноярского края в пределах водосбора бассейна реки Подкаменная Тунгуска от истоков реки до населенного пункта Кузьмовка. Протяженность реки с востока на запад составляет 1700 км<sup>2</sup>, вследствие чего растительный покров в восточной и западной части водосбора существенно отличается. Основная черта климата – резкая континентальность, возрастающая с запада на восток, проявляется в больших различиях между зимними и летними температурами. На территории исследования наблюдается неравномерное распределение осадков: на западе

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Исследование особенностей гидрологического цикла в речных бассейнах таежной зоны Средней Сибири при усилении антропогенного пресса на лесные экосистемы в условиях меняющегося климата» № 20-05-00095.

осадков выпадает 666 мм/год, а в верховьях реки на юго-востоке – 355 мм/год. Все вышеперечисленные условия влияют на суммарное испарение на водосборе.

На основе карт растительного покрова территории Красноярского края была выполнена дифференциация водосбора Подкаменной Тунгуски на лесогидрологические комплексы: гари; лиственничные, сосновые, темнохвойные, березовые, смешанные темнохвойные с лиственничными и лиственничными породами, смешанные темнохвойно-сосновые насаждения. Выделенные лесогидрологические комплексы играют важную стокоформирующую роль на водосборе через свое влияние на суммарное испарение.

База данных Terra MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16), представленная в GEE, была использована для вычисления эвапотранспирации для каждого лесогидрологического комплекса за период 2000-2014 гг. Пространственное разрешение MOD16 – 500 м. По данным MODIS рассчитывалась суммарная эвапотранспирация для каждого сезона. Зимний сезон был определен с 1 ноября по 31 марта, переходные сезоны – с 1 апреля по 31 мая и с 1 сентября по 31 октября, летний сезон – с 1 июня по 31 августа.

Климатические данные, такие как месячные суммы атмосферных осадков и среднемесячные температуры воздуха были получены из архивов Среднесибирского УГМС. На основе метеорологических данных и ЦМР SRTM лесогидрологические комплексы были объединены в более крупные единицы – регионы, характеризующиеся относительно однородными климатическими и лесорастительными условиями.

Геопространственный анализ данных MODIS выполнялся с использованием облачной платформы Google Earth Engine, дифференциация территории на лесогидрологические комплексы выполнялась в ArcGIS.

Анализ данных по эвапотранспирации в границах лесогидрологических комплексов показал, что в зимний период комплексы испаряют 10-14% от суммарного испарения, в переходные сезоны – 25-30%, а в летний период – 60-65%. Также различия в испарении задержанных пологом осадков наблюдаются в зависимости от породного состава и особенностей кроны древостоев. В ходе исследований выявили, что независимо от географического местоположения и метеорологических факторов, наибольшая изменчивость эвапотранспирации характерна для березовых насаждений, для лиственничных и сосновых насаждений просматривается тенденция увеличения показателя эвапотранспирации с запада на восток.

Одним из ключевых факторов, влияющих на эвапотранспирацию является температура воздуха. Особенно это актуально для летнего сезона, когда от температуры зависит интенсивность испарения осадков, задержанных кронами деревьев и физическое испарение с почвы, а также расход влаги на транспирацию растениями. Как показал анализ данных, наибольшие значения эвапотранспирации отмечены в 2001-2003 гг, когда суммы летних температур были максимальные. Тогда как в 2010 г. наблюдались минимальные значения эвапотранспирации, когда лето было самым холодным за период наших наблюдений.

Анализ изменения значения эвапотранспирации лесогидрологических комплексов по годам показал тенденцию к снижению суммарного испарения с 2000 по 2014 гг. Эту тенденцию возможно объяснить с позиции изменения климата на территории бассейна: тренды температуры воздуха показали некоторое повышение при незначительном понижении среднегодовых атмосферных осадков.

Использование данных MOD16 позволило получить количественные данные по эвапотранспирации для различных типов растительного покрова. Анализ полученных данных показал, что значения эвапотранспирации выделенных лесогидрологических комплексов характеризуются значительной изменчивостью как в пространстве, так и во времени. Разброс и вариабельность эвапотранспирации прежде всего зависит от климатических особенностей территории, от изменения погодных условий.

Разработанная дифференциация исследуемой территории на лесогидрологические комплексы и полученные данные по эвапотранспирации для бассейна реки Подкаменной Тунгуски будут использованы в дальнейшем для расчета водного баланса.

Проведенные исследования демонстрируют эффективность совместного использования облачных инфраструктур, таких как GEE, и настольных программных средств (ArcGIS). Использование GEE позволило получить данные по эвапотранспирации для различных типов растительного покрова на обширные территории за длительный период, что существенно сэкономило ресурсы хранения данных и время обработки.

Данилова И. В., Буренина Т. А., 2022

УДК 528.88, 630

## ДИНАМИКА ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ В ХАКАСИИ\*

С. Т. Им<sup>1,2,3\*</sup>, В. Г. Ли<sup>4</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>Институт леса СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН)

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>3</sup>Хакасский Государственный Университет имени Н. Ф. Катанова  
Российская Федерация, 655017, г. Абакан, пр. Ленина, 90

<sup>4</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Установлено, что в Хакасии в 2000–2021 гг. преобладали положительные тренды динамики вегетационных индексов EVI и NDVI (MODIS). Выявлены территории со значимыми корреляциями динамики вегетационных индексов с климатом.*

*Ключевые слова: Хакасия, растительный покров, вегетационные индексы, климат.*

## DYNAMICS OF VEGETATION INDICES AND CLIMATE TRENDS IN KHAKASSIA

S. T. Im<sup>1,2,3\*</sup>, V. G. Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS)  
50/28, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>3</sup>N.F. Katanov Khakassian State University  
90, Lenin prospekt, Abakan, 655017, Russian Federation

<sup>4</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira prospect, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*We analyzed dynamics of vegetation indices (EVI and NDVI) and revealed a dominance of positive trends for 2000–2021 years and determined territories with significant correlations of vegetation indices with climate variables in Khakassia.*

*Keywords: Khakassia, vegetation cover, vegetation indices, climate.*

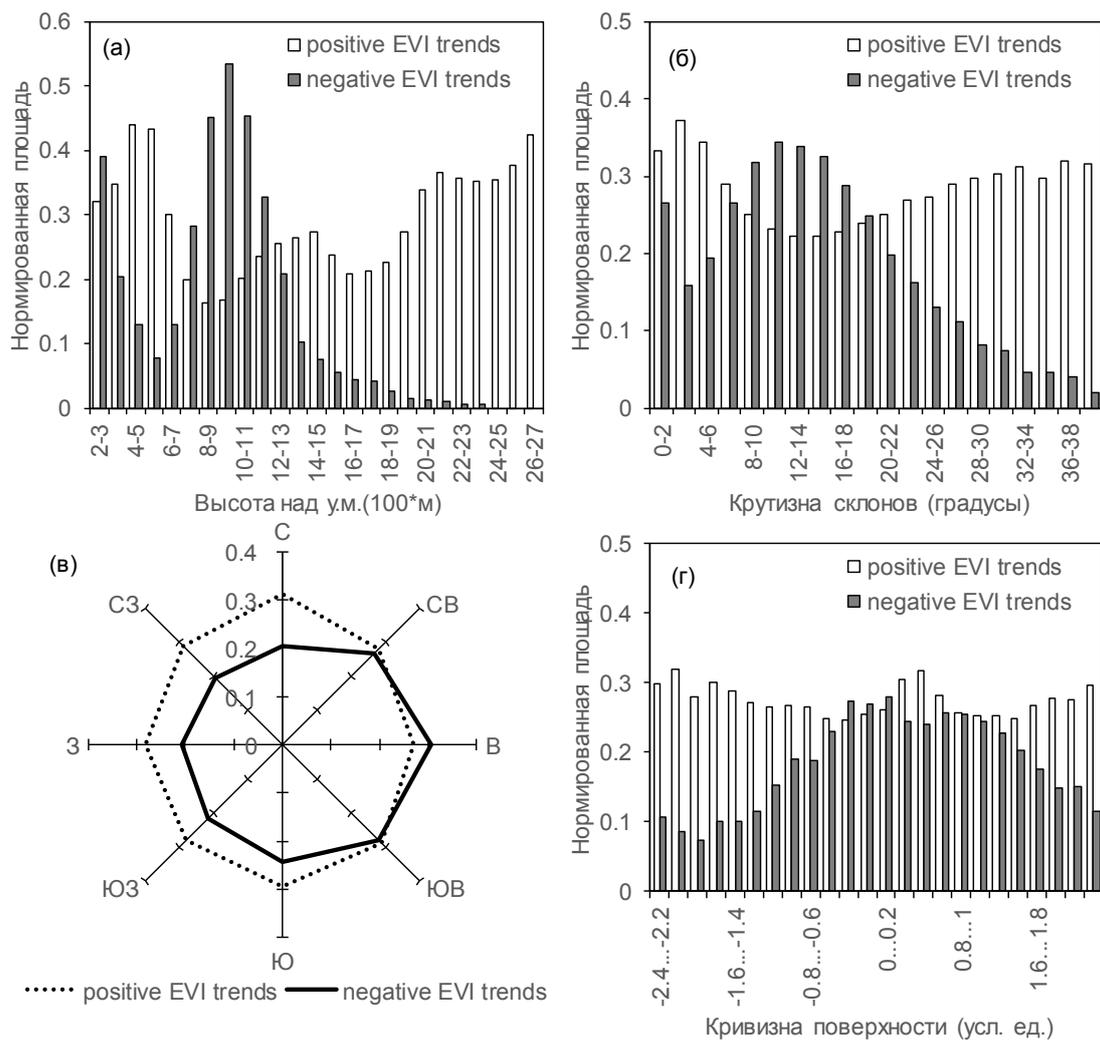
**Введение.** В южной части Сибири с 2000-х годов наблюдается усыхание пихтовых и кедровых лесов в результате распространения насекомых вредителей и негативного воздействия климата [1–2]. С другой стороны, на высотном пределе произрастания древесная растительность продвигаются вверх по градиенту высоты [3]. Данные дистанционного зондирования Земли позволяют проводить исследование динамики лесных территорий на обширных и труднодоступных территориях. Цель данного исследования заключалась в анализе динамики растительного покрова Хакассии в условиях современного климата на основе спектрорадиометрических спутниковых данных Terra/MODIS за 2000–2021 гг.

---

\* 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.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось для территории республики Хакасии ( $53^{\circ}$  с.ш.,  $90^{\circ}$  в.д.; площадь 62 тыс. кв. км). Анализировались тренды вегетационных индексов Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и Enhanced Vegetation Index (EVI), рассчитанных на основе временных серий съемки MODIS за летний период с 2000 по 2021 гг. с пространственным разрешением 231 м. Динамика вегетационных индексов сопоставлялась с орографией местности с использованием цифровой модели рельефа Copernicus GLO30 с пространственным разрешением 30 м [4]. Связь с климатом оценивалась на основе помесечных климатических данных ERA5-Land с пространственным разрешением  $\sim 9$  км [5].

**Результаты.** Положительные тренды вегетационных индексов наблюдались на 10,3–13,5 кв км (16–22% территории), а отрицательные – на 0,7–1,7 тыс. кв. км (1,2–2,8% территории). Пространственная локализация трендов в зависимости от рельефа местности является неоднородным и различается для положительных и отрицательных трендов EVI (см. рисунок).



Распределение положительных (positive) и отрицательных (negative) трендов индексов EVI ( $p < 0,05$ ) в зависимости от (а) высоты над у.м., (б) крутизны, (в) азимутальных направлений склонов и (г) кривизны поверхностей (отрицательные – вогнутые, положительные – выгнутые)

Положительные тренды EVI преобладают на высотных отметках больше 2000 м, и в диапазоне 400–600 м над у.м. на пологих ( $< 6$  градусов) (см. рисунок). Это косвенно подтверждает улучшение состояния растительного покрова в горных районах и продвижение древесной растительности вверх по градиенту высоты. Отрицательные тренды наблюдались на высотах 800–1200 м над у.м. на склонах 8–16 градусов восточной экспозиции.

Таким образом, в течение 2000–2021 гг. на территории Хакасии преобладают положительные тренды вегетационных индексов, пространственное распределение которых является неоднородным относительно рельефа. Высота над уровнем моря является одним из существенных факторов, оказавших влияние на динамику растительного покрова. Динамика вегетационных индексов достоверно связана с летними температурами на 8–15% территории Хакасии, и с летними осадками на 16–22% территории.

#### Библиографические ссылки

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. [и др.]. Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2020. Vol. 30, no. 2. P. 543–556. DOI:10.1111/geb.13243.
2. Kharuk V. I., Im S. T., Oskorbin P. A. [и др.]. Siberian pine decline and mortality in Southern Siberian mountains // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 310. P. 312–320. DOI:10.1016/j.foreco.2013.08.042.
3. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. [и др.]. Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. Vol. 19. P. 822–830. DOI:10.1111/j.1466-8238.2010.00555.x.
4. Геопортал OpenTopography. Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3> (дата обращения: 22.08.2022).
5. Геопортал Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Описание данных ERA5-Land. URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (дата обращения: 22.08.2022).

#### References

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S., Golyukov A. S. Climate-driven conifer mortality in Siberia. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, Vol. 30, No. 2, P. 543–556. doi: 10.1111/geb.13243.
2. Kharuk V. I., Im S. T., Oskorbin P. A., Petrov I. A., Ranson K. J. Siberian pine decline and mortality in Southern Siberian mountains. *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 310, P. 312–320. doi: 10.1016/j.foreco.2013.08.042.
3. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Vdovin A. S. Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia. *Global Ecology and Biogeography*. 2010, Vol. 19, P. 822–830. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00555.x.
4. OpenTopography. Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model. Available at: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3> (accessed 22.08.2022).
5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5-Land. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (accessed 22.08.2022).

© Им С. Т., Ли В. Г., 2022

УДК 528.88, 630

## СВЯЗЬ ДИНАМИКИ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ХАКАСИИ С РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ\*

С. Т. Им<sup>1,2,3\*</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>Институт леса СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН)

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>3</sup>Хакасский Государственный Университет имени Н. Ф. Катанова

Российская Федерация, 655017, г. Абакан, пр. Ленина, 90

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Анализ временной серии карт MODIS IGBP MCD12Q1 показал, что в 2001–2014 гг. наблюдалось сокращение площади древостоев ( $r^2 = 0,99$ ;  $p < 0,05$ ), в 2015–2020 гг. – возрастание ( $r^2 = 0,98$ ;  $p < 0,05$ ). Наблюдаемое связано с рельефом и динамикой климата.*

*Ключевые слова: Хакасия, MODIS, динамика лесов, рельеф.*

## RELATION BETWEEN DYNAMICS OF FOREST TERRITORIES OF KHAKASSIA AND RELIEF

S. T. Im<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS)  
50/28, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>3</sup>N.F. Katanov Khakasian State University  
90, Lenin prospekt, Abakan, 655017, Russian Federation

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Analysis of MODIS IGBP MCD12Q1 maps revealed a decrease in the forest area during 2001–2014 ( $r^2 = 0.99$ ;  $p < 0.05$ ) and an increase ( $r^2 = 0.98$ ;  $p < 0.05$ ) during 2015–2020. These are related to topography and climate.*

*Keywords: Khakassia, MODIS, forest dynamics, relief.*

**Введение.** В Алтае-Саянского регионе наблюдалось частичное усыхание темнохвойных лесов в начале 21-века [1–2]. А в экотонах горной лесотундры происходило распространение деревьев вверх по градиенты высоты [3]. В Хакасии темнохвойные деревья произрастают преимущественно в горной труднодоступной местности. Для их изучения целесообразно применить данные дистанционного зондирования Земли в совокупности с ГИС-технологиями. Цель данной работы заключалась в проведении исследования динамики лесных территорий Хакасии по данным съемки MODIS за 2000–2020 гг. в связи с рельефом местности и климатом.

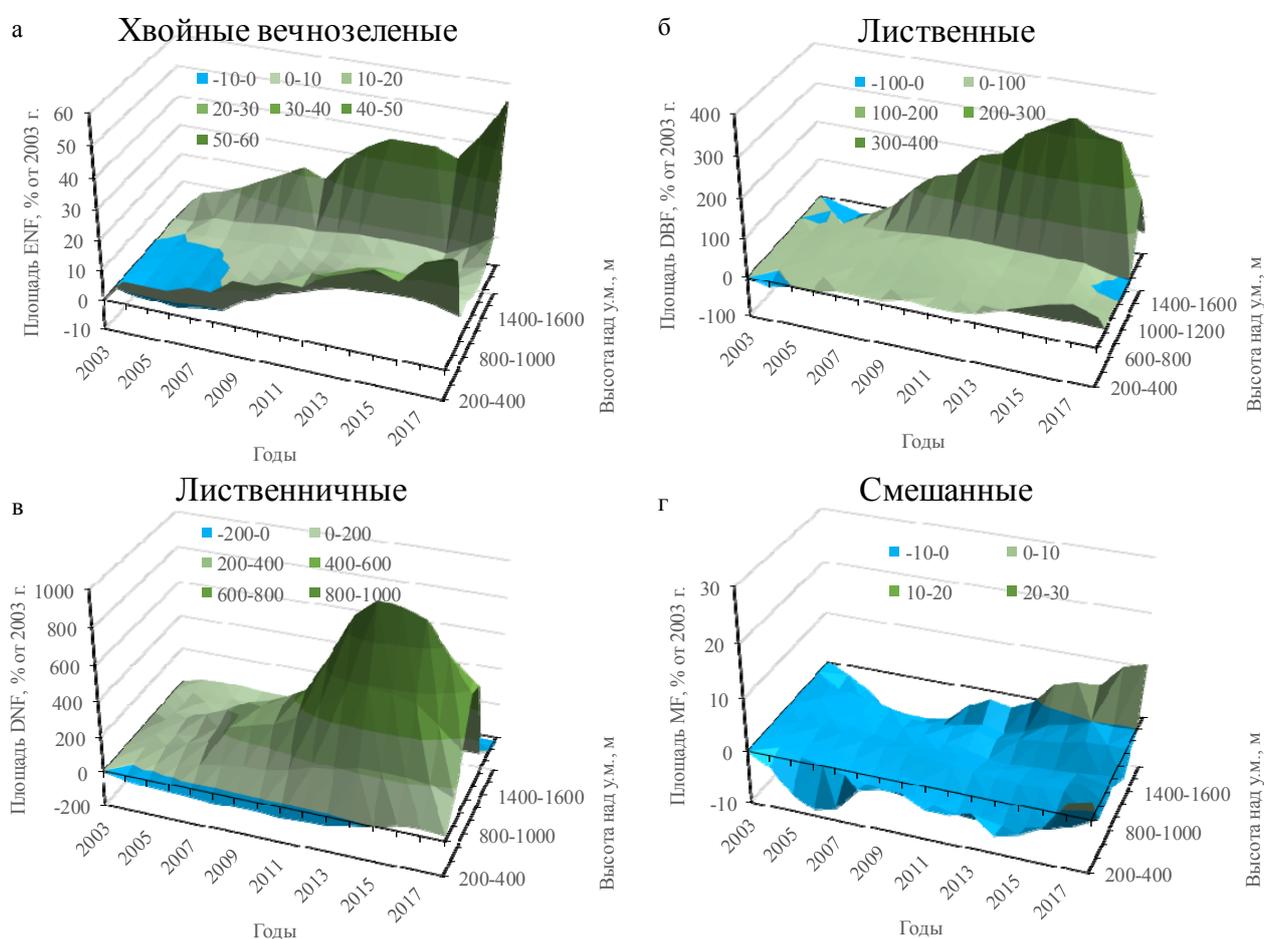
**Материалы и методы.** Анализировались лесные территории республики Хакасии (51.5°–55° с.ш.; 88°–92° в.д.). Площадь анализируемой территории ~61,5 тыс. кв. км. Лесами покрыто ~55% территории. В среднем в год выпадает 692 мм осадков. Средняя годовая температура -0.2°C. Динамика лесных территорий анализировалась по данным серии карт наземного покрова IGBP MODIS

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012>) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

MCD12Q1 за 2001–2020 гг. (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006>; пространственное разрешение 500 м) Динамика лесных территорий сопоставлялась с орографией местности с использованием цифровой модели рельефа Sorenicus GLO30 с пространственным разрешением 30 м [4] и климатом на основе помесечных климатических данных ERA5-Land с пространственным разрешением ~9 км [5].

**Результаты.** В период 2001–2014 гг. площадь древостоев сократилась на 945 кв. км (тренд  $r^2 = 0,99$ ;  $p < 0,05$ ), к 2020 г. – почти восстановилась. Площадь кустарниковых сообществ уменьшалась в течение всего периода наблюдений на 2,9 кв. км в год ( $r^2 = 0,69$ ). Динамика древостоев на разных высотах над уровнем моря значительно отличалась. Площадь вечнозеленых хвойных (ВЗХ) лесов уменьшалась на высотах до 1000 м в течение 2003–2007 гг., а после стала нарастать (см. рисунок, а). Наибольший рост их площади наблюдался на высотах >1500 м. Похожее наблюдалось для лиственных лесов (см. рисунок, б).

Лиственничные древостои значительно увеличили свою площадь на высотах 400–1400 м (~400% к 2018 г.), но при этом их площадь сократилась на высотах больше 1600 м (см. рисунок, в). В отличие от предыдущих площадь смешанных лесов сокращалась на всех высотных срезах до 1800 м над у.м., а выше площадь немного возросла (см. рисунок, г).



Динамика изменения площадей (а) хвойных вечнозеленых, (б) лиственных, (в) лиственничных и (г) смешанных древостоев в зависимости от высоты над у.м.

Динамика площадей вечнозеленых хвойных и лиственничных древостоев положительно связана с температурами апреля ( $r = 0,52$  и  $0,54$ ;  $p < 0,05$ ). Динамика смешанных древостоев положительно связаны с температурами мая ( $r = 0,57$ ;  $p < 0,05$ ), а лиственных – отрицательно ( $r = -0,65$ ;  $p < 0,05$ ). На площадь лиственных древостоев отрицательно влияли осадки в июне ( $r = -0,50$ ;  $p < 0,05$ ), а в июле – положительно ( $r = 0,46$ ;  $p < 0,05$ ).

**Заклучение.** Наблюдаемые по картам IGBP изменения площадей древостоев в Хакасии являются неоднозначными. В целом, наблюдается точка перегиба в 2014–2015 гг., когда динамика площади древостоев сменилась с отрицательной на положительную. На происходящие процессы связаны с рельефом местности, апрельскими и майскими температурами, июньскими и июльскими осадками.

#### Библиографические ссылки

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. [и др.]. Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2020. Vol. 30, no. 2. P. 543–556. DOI:10.1111/geb.13243.
2. Kharuk V. I., Im S. T., Oskorbin P. A. [и др.]. Siberian pine decline and mortality in Southern Siberian mountains // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 310. P. 312–320. DOI:10.1016/j.foreco.2013.08.042.
3. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. [и др.]. Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. Vol. 19. P. 822–830. DOI:10.1111/j.1466-8238.2010.00555.x.
4. Геопортал OpenTopography. Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3> (дата обращения: 22.08.2022).
5. Геопортал Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Описание данных ERA5-Land. URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (дата обращения: 22.08.2022).

#### References

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S., Golyukov A. S. Climate-driven conifer mortality in Siberia. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, Vol. 30, No. 2, P. 543–556. doi: 10.1111/geb.13243.
2. Kharuk V. I., Im S. T., Oskorbin P. A., Petrov I. A., Ranson K. J. Siberian pine decline and mortality in Southern Siberian mountains. *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 310, P. 312–320. doi: 10.1016/j.foreco.2013.08.042.
3. Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Vdovin A. S. Spatial distribution and temporal dynamics of high elevation forest stands in southern Siberia. *Global Ecology and Biogeography*. 2010, Vol. 19, P. 822–830. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00555.x.
4. OpenTopography. Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model. Available at: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3> (accessed 22.08.2022).
5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5-Land. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (accessed 22.08.2022).

© Им С. Т., Ли В. Г., 2022

УДК 004.4:528.8

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

А. А. Кадочников

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/44  
E-mail: scorant@icm.krasn.ru

*Рассматриваются методы и инструменты сбора оперативных данных с постов наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в Красноярском крае. С помощью веб-сервисов реализован сбор данных от различных источников данных в единую систему.*

*Ключевые слова: ГИС, пространственные данные, атмосферный воздух, система мониторинга, веб-картография.*

## DEVELOPMENT OF A DATA COLLECTION SYSTEM FOR THE TASKS OF ANALYSIS THE STATE OF ATMOSPHERIC AIR

A. A. Kadochnikov

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: scorant@icm.krasn.ru

*The article discusses methods and tools for collecting operational data from monitoring posts for the state of atmospheric air in the Krasnoyarsk region. The collection of data from various data sources into a single system is implemented using web services.*

*Keywords: GIS, atmospheric air, spatial data, monitoring system, web-cartography.*

Уже несколько лет сотрудниками Института вычислительного моделирования СО РАН продолжается работа по поддержке и развитию системы сбора оперативной информации о состоянии атмосферного воздуха в городе Красноярск и Красноярском крае. Сбор оперативных данных для научных исследований и мониторинга состояния атмосферного воздуха осуществляется в единую систему «Данные оперативного мониторинга» Института вычислительного моделирования СО РАН (<https://sensor.krasn.ru/sc/>) [1,2].

На начало 2022 года реализован сбор оперативных данных по атмосферному воздуху в Красноярском крае и Красноярске с нескольких источников и созданы следующие разделы:

- Система мониторинга состояния атмосферного воздуха ФИЦ КНЦ СО РАН.
- Подсистема мониторинга атмосферного воздуха КВИАС КГБУ «ЦРМПиООС».
- Данные системы мониторинга ФГБУ «Среднесибирское УГМС».
- Оперативные данные метеонаблюдений СИНОП.
- Данные проекта nebo.live.
- Данные проекта Эковизор.
- Данные с ряда метеостанций и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

На старте создания системы данные об атмосферном воздухе загружались из федеральной и краевой сети постов наблюдения. Данные федеральной сети формируются на основе данных, полученных с сайта ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (<http://meteo.krasnoyarsk.ru/>). Архив ведется с начала 2013 года. Данных по загрязняющим веществам в открытом доступе нет. Данные краевой сети формируются из Краевой ведомственной информационно-аналитической системы (КВИАС) о состоянии окружающей среды Красноярского края.

Наблюдения за качеством атмосферного воздуха в Красноярском крае проводятся на 12 автоматизированных постах наблюдений (АПН). Помимо метеоданных доступны данные по большому числу загрязняющих веществ, включая данные по содержанию взвешенных частиц [3].

Осуществляется сбор данных с собственной сети станций Федерального исследовательского центра «КНЦ СО РАН». Данные собираются с 24 устройств измерений автоматизированной информационной системы мониторинга качества воздуха и позволяют получать данные измерений содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе (PM2.5, PM10) и основные метеорологические параметры: температура, влажность и атмосферное давление [4].

В начале апреля 2021 года между министерством экологии Красноярского края, Сибирским отделением РАН и общественными организациями было достигнуто соглашение о создании единой системы мониторинга атмосферного воздуха [5]. В результате сотрудниками Института организован сбор дополнительных данных об атмосферном воздухе со станций двух общественных проектов с использованием публичных API.

Данные проекта Nebo community (<https://nebo.live>), созданного активистами из Красноярска. И данные открытой экологической платформы «Российские зеленые», проект «Эковизор» (<http://online.russiangureens.ru>). Оба проекта осуществляют сбор с приборов данных измерений содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе PM2.5 и основных метеорологических параметров: температура, влажность и атмосферное давление. Часть приборов проекта «Эковизор» оборудованы анемометрами, что позволяет получать информацию о ветре.

В связи с большим количеством постоянных источников данных и объемом самих данных был модернизирован сервис системы мониторинга загрузки и анализа ошибок, позволяющий получать информацию о процессе загрузки данных в удобном виде для оперативного принятия решений и исправления ошибок. А также для отслеживания объема поступающих данных в систему. Для оперативной доработки программных модулей сбора данных в дополнение текстовой информации о процессе работы модулей и инструментам оповещения оператора создан сервис сбора статистики. Сервис позволяет накапливать и анализировать информацию с различных программ сбора данных в единой базе данных. Такое решение повышает качество инструментов и сервисов для разработки систем мониторинга окружающей природной среды и повышает стабильность и надежность работы системы в целом.

Сервис статистики позволил проанализировать процесс сбора данных, в результате чего была выполнена оптимизация работы ряда сервисов и уменьшен объем загружаемых данных в систему. Некоторые данные загружаются в систему сбора данных наблюдений с наложением на уже существующие данные. Загрузка излишних данных связана с целью предотвратить потерю информации, временно неработающих внешних сервисов, которые не позволяют получать данные по всем постам независимо. Общее число хранимых данных, меньше загружаемых в систему.

За исключением некоторых постов наблюдений, по которым статистика начала собираться недавно. Среднее число загружаемых показателей с датчиков на постах составляет порядка 10 миллионов в месяц, количество загрузок порядка 14 тысяч раз в месяц на начало 2022 года.

В работе было предложено решение, которое позволило собирать все данные в одном хранилище с возможностью дальнейшего анализа. Могут использоваться данные не только наземных постов наблюдения и БПЛА, но и данные с космических спутников. Комплекс предлагаемых решений успешно зарекомендовал себя как программно-технологическая основа для информационно-аналитических систем регионального уровня.

Рассмотренное решение может быть использовано не только для территории Красноярского края, но и в других городах и регионах. С использованием веб-сервисов системы разработан ряд проектов с данными наблюдений, включая сайт и его подразделы с оперативной информацией об атмосферном воздухе в Красноярске, других городах и муниципальных образованиях Красноярского края (<https://air.krasn.ru/>).

### Библиографические ссылки

1. Kadochnikov A.A. Experience in the development a regional geoportal for the Krasnoyarsk region. *Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS" 2020*. Vol. 26, Issue 1, P. 203–214. doi: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-203-214
2. Токарев А.В. Программно-технологическое обеспечение для сбора и хранения данных серийных наблюдений за состоянием окружающей среды. // Материалы международной конференции Ин-

терКарто-ИнтерГИС 20 «Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение». (Белгород, Россия, 23-24 июля 2014 г.) Белгород: Константа, 2014. С. 228–236.

3. Информация о состоянии атмосферного воздуха. Подсистема мониторинга атмосферного воздуха. URL: <http://krasecology.ru/Air/> (дата обращения 03.09.2022).

4. Azemov D. Saint-Petersburg air pollution monitoring system. *Environment of Saint- Petersburg, 2016*. Vol 2 (2), P. 8–14.

5. В крае создадут единую систему мониторинга атмосферного воздуха. URL: <http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/news/0/news/99643> (дата обращения 03.09.2022).

### References

1. Kadochnikov A.A. [Experience in the development a regional geoportal for the Krasnoyarsk region]. *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS” 2020*. Vol. 26, Issue 1, P. 203–214. doi: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-203-214

2. Tokarev A.V. [Software and technology for collecting and storage serial observations of the environment]. *Materialy mezhdunarodnoj konferencii InterKarto-InterGIS 20 «Ustojchivoe razvitie territorij: kartografo-geoinformacionnoe obespechenie»* [Proceeding of the International Conference “Sustainable development of territories: Cartography and GI Support”]. Belgorod, 2014, P. 228–236 (In Russ.).

3. *Informacija o sostojanii atmosfernogo vozduha* [Information about the state of atmospheric air]. (In Russ.). Available at: <http://krasecology.ru/Air/> (accessed 03.09.2022).

4. Azemov D. Saint-Petersburg air pollution monitoring system. *Environment of Saint- Petersburg, 2016*. Vol 2 (2), P. 8–14.

5. *V krae sozdadut edinuju sistemu monitoringa atmosfernogo vozduha* [A unified system for monitoring atmospheric air will be created in the region]. (In Russ.). Available at: <http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/news/0/news/99643> (accessed 03.09.2022).

© Кадочников А. А., 2022

УДК 528.88, 504.45

## ДИНАМИКА ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТАЙМЫРСКОГО ПОЛУОСТРОВА С КОНЦА 20 ВЕКА

А. С. Котцова

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

*По данным Global Water Surface оценено возрастание водных поверхностей северо-западной части Таймырского полуострова с 1985 года по 2020 год. Выявлены связи динамики водных масс с температурами и осадками.*

*Ключевые слова: криолитозона, потепление климата, динамика водных поверхностей, Таймырский полуостров.*

## DYNAMICS OF WATER SURFACES OF THE NORTH-WESTERN PART OF THE TAIMYR PENINSULA SINCE THE END OF THE 20TH CENTURY

A. S. Kottsova

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

*According to Global Water Surface, the increase in the water surfaces of the northwestern part of the Taimyr Peninsula from 1985 to 2020 has been estimated. The connections of the dynamics of water masses with temperatures and precipitation are revealed.*

*Keywords: cryolithozone, climate warming, dynamics of water surfaces, Taimyr Peninsula.*

**Введение.** В связи с современными изменениями климата возникает необходимость проведения анализа динамики водных поверхностей, поскольку происходящие процессы оказывают существенное влияние на водный баланс и перемещение водных масс. На данный момент времени по всему миру активно ведутся исследования о динамике водных поверхностей, но в особенности необходимо уделить внимание криолитозоне, так как таяние вечной мерзлоты оказывает существенное воздействие на инфраструктуру промышленных комплексов и населенных пунктов, расположенных в северной части России [1].

**Объект исследования.** Анализировалась северо – западная часть Таймырского полуострова. Территория исследования составляет 200 000 кв. км, и характеризуется большим количеством водных поверхностей (поскольку таяние мерзлоты приводит к ускорению термокарстовых процессов, что проявляется в изменении размеров и числа озёр в зоне мерзлоты) [2-3].

**Материалы и методика.** В исследовании использовались данные с классификацией водных поверхностей с сервиса *Global Water Surface* за 1985 – 2020 гг.. Эти карты были созданы из отдельных сцен (изображений), полученных спутниками Landsat 5, 7 и 8 [4]. Производился расчет количества водных объектов. Климатические данные получены с сервиса *CRU*, они использовались для выявления связи динамики водных поверхностей с климатом [5]. Геообработка производилась средствами программного обеспечения ESRI ArcGIS Desktop.

**Результаты и обсуждение.** За период наблюдения (35 лет) количество водных поверхностей имеет тенденцию увеличения, так, например, с 2010 по 2020 года количество водных поверхностей увеличилось более чем в два раза (рис. 1).

Были выявлены достоверные положительные связи динамики количества водных объектов с летними температурами ( $r = 0,86$ ;  $p < 0,006$ ) и площадей водных поверхностей с летними температурами ( $r = 0,7$ ;  $p < 0,04$ ) (рис. 2).

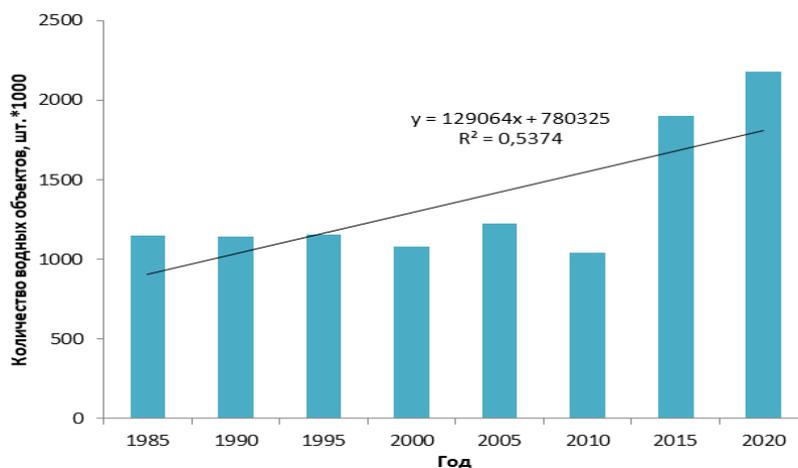


Рис. 1. Динамика количества водных поверхностей

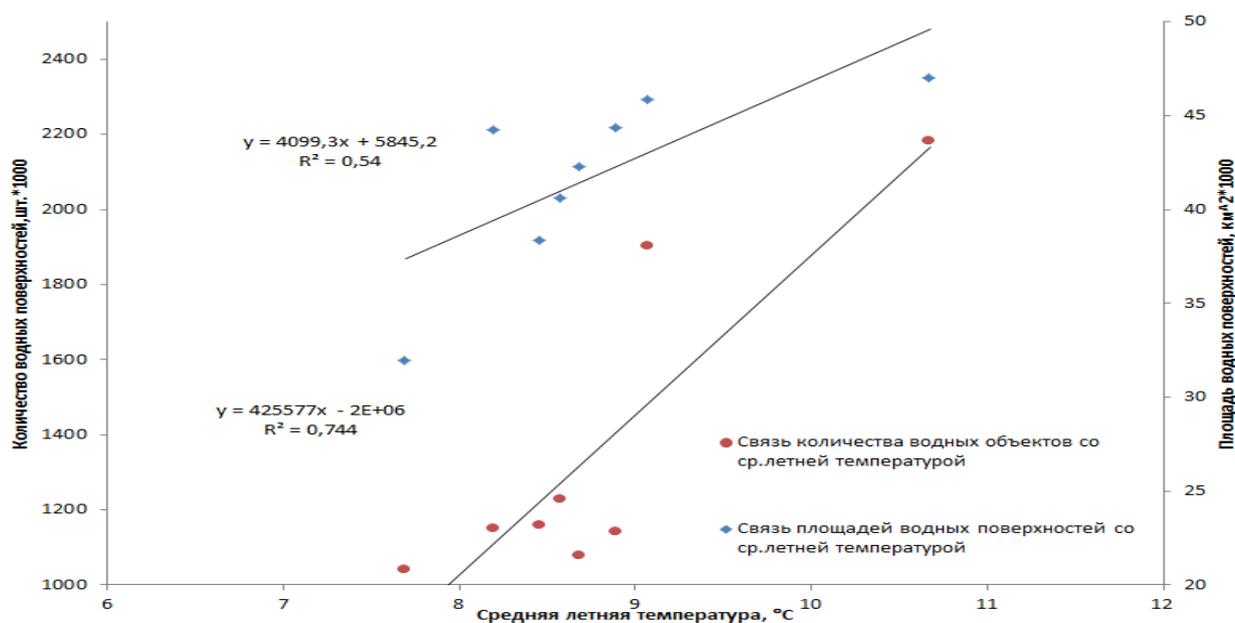


Рис. 2. Связь количества и площади водных поверхностей с летними температурами

На основе полученных данных можно сказать, что возрастание летних температур на 1 градус по Цельсию способствует возрастанию площади водных поверхностей  $\sim 2000$  кв. км и увеличению числа водных поверхностей примерно на 200 тыс. объектов.

Также анализировалась связь динамики водных объектов с годовыми осадками, но значения корреляций были не высокие. Но нужно учесть, что влияние осадков на озера может быть накопительным. Поэтому проводился анализ связи количества водных поверхностей с количеством осадков за два года. Были выявлены достоверные положительные связи динамики количества водных поверхностей с количеством осадков за два года ( $r = 0,75$ ;  $p < 0,04$ ).

**Заключение.** В ходе исследования выявлено, что с 2010 года наблюдается тенденция роста количества водных объектов и их площадей. Также видно, что положительная динамика площадей и количества водных поверхностей обусловлена повышением средней летней температуры и накоплением осадков. Обнаруженная закономерность может быть объяснена тем, что в последние десятилетия

наблюдается потепление климата. Вследствие этого в северной части Красноярского края происходит таяние многолетнемерзлых пород, ускоряющее термокарстовые процессы, сопровождаемые ростом количества и площадей термокарстовых озёр криолитозоны.

### Библиографические ссылки

1. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / ed. O. Pokrovsky. N.Y.: Nova Science Publishers, 2014. P. 205–234. DOI: 10. 978-94-007-4569-8.
2. Таймыр // Большая российская энциклопедия. 2017. URL: <https://bigenc.ru/geography/text/4179596> (дата обращения: 20.05.2021).
3. Кравцова В.И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
4. F. Pekel, A. Cottam, N.Gorelick, A.S. Belward. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes / F. Pekel. Текст: электронный // NATURE: сайт. 2016. 15 декабря. URL: <https://www.nature.com/articles/nature20584> (дата обращения: 10.04.2022).
5. CRU Data [Электронный ресурс]: Режим доступа: свободный URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg%20/> (дата обращения: 09.06.2022).

### References

1. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / ed. O. Pokrovsky. N.Y.: Nova Science Publishers, 2014. P. 205–234. DOI: 10. 978-94-007-4569-8.
2. Таймыр, Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya (The Great Russian Encyclopedia), 2017, available at: <https://bigenc.ru/geography/text/4179596> (accessed: 29.03.2021) (in Russian).
3. Kravtsova V.I., Rodionova T.V., Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images, Kriosfera Zemli, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 81–89 (in Russian).
4. F. Panel, A. Cottam, N.Gorelik, A.S. Belward. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes / F. Pekel. Text: electronic // NATURE: website. 2016. December 15. URL: <https://www.nature.com/articles/nature20584> (accessed: 10/04/2022).
5. CRU Data [Electronic resource]: Access mode: free URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg%20/> (accessed: 09/06/2022).

© Котцова А. С., 2022

УДК 519.7

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ 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

*Предлагается модифицированный непараметрический алгоритм автоматической классификации статистических данных большого объёма. Эти условия характерны при анализе информации дистанционного зондирования. Его применение позволяет обнаруживать классы, соответствующие одномодальным фрагментам плотности вероятности.*

*Ключевые слова: непараметрический алгоритм автоматической классификации, многомерная гистограмма, регрессионная оценка плотности вероятности, данные дистанционного зондирования.*

## MODIFIED NONPARAMETRIC ALGORITHM FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF 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

*A modified nonparametric algorithm for automatic classification of large-volume statistical data is proposed. These conditions are characteristic in the analysis of remote sensing information. Its application makes it possible to detect classes corresponding to unimodal fragments of the probability density.*

*Keyword: nonparametric automatic classification algorithm, multidimensional histogram, regression estimation of probability density, remote sensing data.*

Проведём совершенствование и алгоритмизацию непараметрической процедуры статистических данных большого объёма, предложенный в работах [1, 2]. В качестве методической основы принимаются результаты исследований [3-12].

Пусть имеется выборка многомерных статистических данных  $V = (x_v^i, v = \overline{1, k}, i = \overline{1, n})$  большого объёма  $n$ , распределённая с неизвестной плотностью вероятности  $p(x) = p(x_1, \dots, x_k)$ . Необходимо выборку  $V$  разбить на группы компактных наблюдений  $V_j, j = \overline{1, M}$ , количество которых неизвестно. Под компактной группой наблюдений будем считать область их значений, соответствующей одномодальному фрагменту плотности вероятности  $p(x)$ .

Следуя методике синтеза регрессионной оценки плотности вероятности преобразуем исходную выборку  $V$  в массив данных  $\bar{V} = (z^t, \bar{P}^t, t = \overline{1, N})$  [13, 14]. Здесь  $z^t$  – координаты  $t$ -го центра дискретизации области значений случайной величины  $x$ , а  $\bar{P}^t$  – частота попадания в этот интервал наблюдений из выборки  $V$ .

Для обнаружения первого класса по информации массива данных  $\bar{V}$  выберем элемент  $(z^j, \bar{P}^j)$ , который определяется условием

$$\bar{P}^j = \max_{t=1, \bar{N}} \bar{P}^t.$$

Этот элемент  $(z^j, \bar{P}^j)$  соответствует максимальному значению регрессионной оценки плотности вероятности  $\bar{p}(x)$ . Тогда начальный этап формирования элементов, принадлежащих первому классу  $\Omega_1$ , определим правилом  $z^t \in \Omega_1$ , если

$$\prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{z_v^t - z_v^j}{c_v}\right) 1(\bar{P}^t, \bar{P}^j) > 0, \quad t = \overline{1, \bar{N}}, \quad t \neq j. \quad (1)$$

При ядерной функции вида

$$\Phi\left(\frac{z_v^t - z_v^j}{c_v}\right) = \begin{cases} 0,5, & \text{если } |z_v^t - z_v^j| = c_v \\ 0, & \text{если } |z_v^t - z_v^j| > c_v, \end{cases}$$

$$1(\bar{P}^t, \bar{P}^j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{P}^t \leq \bar{P}^j \\ 0, & \text{если } \bar{P}^t > \bar{P}^j, \end{cases}$$

где  $c_v = 2\beta_v$ . При этих значениях  $c_v$  определяются элементы массива  $\bar{V}$  смежных с элементом  $(z^j, \bar{P}^j)$ .

Обозначим через  $I_1$  – множество номеров элементов массива данных  $\bar{V}$ , отнесённых на первом этапе автоматической классификации в соответствии с правилом (1) к первому классу  $\Omega_1$ . Множество  $I_1$  включает номер  $j$  элемента  $(z^j, \bar{P}^j)$ .

Второй этап классификации осуществляется решающим правилом  $z^t \in \Omega_1$ , если

$$\sum_{j \in I_1} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{z_v^t - z_v^j}{c_v}\right) 1(\bar{P}^t, \bar{P}^j) > 0, \quad t \in I \setminus I_1, \quad t \neq j, \quad I = \overline{1, \bar{N}}. \quad (2)$$

По аналогии на  $t$ -ом этапе автоматической классификации элементы выборки  $\bar{V}$ , принадлежащие первому классу  $\Omega_1$ , определяются решающим правилом  $z^t \in \Omega_1$ , если

$$\sum_{j \in I_{t-1}} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{z_v^t - z_v^j}{c_v}\right) 1(\bar{P}^t, \bar{P}^j) > 0, \quad t \in I \setminus (I_1 \cup I_2 \dots \cup I_{s-1}). \quad (3)$$

Последовательная процедура автоматической классификации (1) – (3) продолжается до выполнения условия  $I_s = \emptyset$ , когда отсутствует обнаружение новых элементов массива данных  $\bar{V}$  из класса  $\Omega_1$ .

Для обнаружения элементов массива  $V_2 \in \bar{V}$ , принадлежащих второму классу  $\Omega_2$ , из оставшихся данных  $\bar{V} \setminus V_1$  выбирается элемент  $(z^j, \bar{P}^j)$  с максимальным значением  $\bar{P}^j$  и предложенная выше процедура автоматической классификации используется для определения класса  $\Omega_2$ .

По аналогии формируются оставшиеся классы, количество которых априори не определено.

## Библиографические ссылки

1. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им и др. // *Автометрия*. 2019. Т. 55, №3. С. 22–30.
2. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объёма и его применение / И. В. Зеньков, А. В. Лапко, В. А. Лапко и др. // *Компьютерная оптика*. 2021. Т.45, №2. С. 253–260.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ непараметрических алгоритмов распознавания образов в условиях пропуска данных // *Автометрия*. 2008. Т.44, №3. С. 65–74.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры семейства непараметрических решающих функций в задаче распознавания образов // *Автометрия*. 2011. Т. 47, №4. С. 76–82.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений двухмерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2016. №2. С. 14–17.
6. 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.
7. Лапко А. В., Лапко В. А., Егорочкин И. А. Непараметрические оценки смеси плотностей вероятности и их применение в задаче распознавания образов // *Системы управления и информационные технологии*. 2009. Т. 35, №1. С. 60–64.
8. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив непараметрических решающих функций в двухальтернативной задаче распознавания образов // *Системы управления и информационные технологии*. 2009. Т.37, №3-1. С. 156–160.
9. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая оценка уравнения разделяющей поверхности в условиях больших выборок и её свойства // *Системы управления и информационные технологии*. 2010. Т.39, №1-2. С. 300–304.
10. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры смеси непараметрических оценок плотности вероятности многомерной случайной величины // *Системы управления и информационные технологии*. 2011. Т.43, №1. С. 12–15.
11. Лапко А. В., Лапко В. А. Свойства непараметрической оценки плотности вероятности многомерных случайных величин в условиях больших выборок // *Информатика и системы управления*. 2012. Т.32, №2. С. 121–126.
12. Лапко В. А., Капустин А. Н. Синтез нелинейных непараметрических решающих правил в задачах распознавания образов // *Автометрия*. 2006. Т. 42, № 6. С. 26–33.
13. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка многомерной плотности вероятности и её свойства // *Автометрия*. 2014. Т.50, №2. С. 50–56.
14. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка плотности вероятности и её свойства // *Системы управления и информационные технологии*. 2012. Т.49, №3-1. С. 152–156.

## References

1. 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.
2. 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.)
3. Lapko A. V., Lapko V. A. Analysis of nonparametric pattern recognition algorithms under incomplete data. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, Vol. 44, No. 3, p. 238–244.
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Synthesis of the structure of a family of nonparametric decision functions in the pattern recognition problem. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, Vol. 47, No. 4, p. 382–387.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable. *Measurement Techniques*, 2016, Vol. 59, No. 2, p. 122–126.

6. 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 (In Russ.)
7. Lapko A. V., Lapko V. A., Egorochkin I. A. [Nonparametric estimates of a mixture of probability densities and their application in the problem of pattern recognition]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2009, Vol. 35, No. 1, p. 60–64. (In Russ.)
8. Lapko A. V., Lapko V. A. [A collective of nonparametric solving functions in a two-alternative pattern recognition problem]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2009, Vol. 37, No. 3-1, p. 156–160. (In Russ.)
9. Lapko A. V., Lapko V. A. [Nonparametric estimation of the separating surface equation in conditions of large samples and its properties]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2010, Vol. 39, No. 1-2, p. 300–304. (In Russ.)
10. Lapko A. V., Lapko V. A. [Synthesis of the structure of a mixture of nonparametric estimates of the probability density of a multidimensional random variable]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2011, Vol. 43, No. 1, p. 12–15. (In Russ.)
11. Lapko A. V., Lapko V. A. [Properties of nonparametric estimation of the probability density of multidimensional random variables in conditions of large samples]. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2012, Vol. 32, No.2, p. 121–126. (In Russ.)
12. Лапко В. А., Капустин А. Н. [Synthesis of nonlinear nonparametric decision rules in pattern recognition problems]. *Avtometriya*, 2006, Vol. 42, No. 6, p. 26–33. (In Russ.)
13. Lapko A. V., Lapko V. A. Regression estimate of the multidimensional probability density and its properties, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014, Vol. 50, No.2, p. 148-153.
14. Lapko A. V., Lapko V. A. [Regression estimate of the probability density and its properties]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2012, Vol. 49, No.3-1, p. 152–156. (In Russ.)

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2022

УДК 519.7

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

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

*Предлагается модифицированная методика проверки гипотезы о распределениях случайных величин. Синтез методики основан на определении максимального расхождения между оценками функций распределения сравниваемых случайных величин и построении доверительных интервалов вероятностей соответствующих этому условию.*

*Ключевые слова: проверка гипотез о распределениях случайных величин, критерий Колмогорова-Смирнова, критерий Пирсона, модифицированный метод проверки гипотез, доверительные интервалы, формула Старджесса, формула Хайнхольда-Гаеде.*

## NONPARAMETRIC METHODS FOR TESTING HYPOTHESES ABOUT DISTRIBUTIONS OF RANDOM VARIABLES

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

*A modified method for testing the hypothesis of distributions of random variables is proposed. The synthesis of the method is based on determining the maximum discrepancy between the estimates of the distribution functions of the compared random variables and constructing confidence intervals for probabilities corresponding to this condition.*

*Keyword: testing hypotheses about distributions of random variables, Kolmogorov-Smirnov criterion, Pearson criterion, modified hypothesis testing method, confidence intervals, Sturges rule, Heinhold-Gaede rule.*

Задачи проверки гипотез о распределениях случайных величин являются одними из основных при обработке данных дистанционного зондирования. На основе их решения осуществляется агрегирование результатов автоматической классификации спектральных данных природных объектов и сравнение их количественных характеристик. При проверке гипотез о распределениях одномерных случайных величин используется критерий Колмогорова – Смирнова [1]. Для проверки гипотез о распределениях многомерных случайных величин применяется критерий согласия Пирсона, который содержит трудно формализуемый этап разбиения области значений случайных величин на многомерные интервалы [2]. В работе [3] обоснована возможность обхода данной проблемы путём использования непараметрического алгоритма распознавания образов, соответствующего критерию максимального правдоподобия. Методическую основу предлагаемого подхода составляют результаты исследований [4-13].

Цель данной работы заключается в согласовании методики проверки гипотезы о распределениях случайных величин Колмогорова – Смирнова с традиционной процедурой доверительного оценивания, соответствующих им вероятностей.

Пусть  $X_1$  и  $X_2$  – две генеральные совокупности с произвольными законами распределения. Необходимо по независимым выборкам  $V_1 = (x^i, i = \overline{1, n_1})$  и  $V_2 = (x^i, i = \overline{1, n_2})$ , извлечённых из данных генеральных совокупностей, проверить либо опровергнуть гипотезу

$$H_0: F(x_1) \equiv F(x_2)$$

о тождественности их законов распределения.

По выборкам  $V_1$  и  $V_2$  определим оценки функций распределения  $\bar{F}_j(x)$ ,  $j = 1, 2$  и найдём соответствующие им максимальное расхождение

$$\bar{D}_{12} = \max_{x^i, i=1, n} |\bar{F}_1(x^i) - \bar{F}_2(x^i)|.$$

Пусть в наблюдении под номером  $t$  из выборок  $V_1, V_2$  значение  $\bar{D}_{12}$  является максимальным.

Определим параметры доверительных интервалов для вероятностей  $F_1(x^t), F_2(x^t)$  с использованием их оценок в соответствии с выражениями

$$\Delta_1 = u_\alpha \sqrt{\frac{\bar{F}_1(x^t)(1 - \bar{F}_1(x^t))}{n_1}}; \Delta_2 = u_\alpha \sqrt{\frac{\bar{F}_2(x^t)(1 - \bar{F}_2(x^t))}{n_2}}.$$

Здесь критическая точка  $u_\alpha$  определяется по таблице функции Лапласа  $\Phi(u_\alpha)$  из условия равенства  $\Phi(u_\alpha) = (1 - \alpha)/2$ , где  $\alpha$  – принятый уровень значимости. Например, при  $\alpha=0,05$  значение  $u_\alpha=1,96$ , а при  $\alpha=0,03$  значение  $u_\alpha=2,17$ .

Если доверительные интервалы пересекаются, то существует вероятность равенства значений  $F_1(x^t), F_2(x^t)$ . Тогда критерий проверки гипотезы о распределениях одномерных случайных величин состоит в выполнении условия: гипотеза  $H_0$  выполняется, если  $\bar{D}_{12}(x^t) < \Delta_1 + \Delta_2$ , в противном случае гипотеза отвергается.

По результатам анализа законов распределения модифицированная методика проверки гипотезы о распределениях случайных величин сопоставима с критерием Колмогорова – Смирнова и Пирсона. Однако предлагаемая методика позволяет обойти проблему дискретизации области значений случайных величин на интервалы, что свойственно критерию Пирсона. В отличие от критерия Колмогорова – Смирнова рассматриваемая методика обеспечивает её развитие на проверку гипотезы о распределениях многомерных случайных величин.

### Библиографические ссылки

1. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
2. Пугачёв В. С. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. М.: Физматлит, 2002. 496 с.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки статистической гипотезы о тождественности двух законов распределения случайных величин // Автотметрия. 2010. Т. 46, № 6. С. 47–53.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ непараметрических алгоритмов распознавания образов в условиях пропуска данных // Автотметрия. 2008. Т. 44, №3. С. 65–74.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры семейства непараметрических решающих функций в задаче распознавания образов // Автотметрия. 2011. Т. 47, №4. С. 76–82.
6. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений двумерной случайной величины // Измерительная техника. 2016. №2. С. 14–17.
7. 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.
8. Лапко А. В., Лапко В. А., Егорочкин И. А. Непараметрические оценки смеси плотностей вероятности и их применение в задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т. 35, №1. С. 60–64.

9. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив непараметрических решающих функций в двухальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. Т.37, №3-1. С. 156–160.
10. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая оценка уравнения разделяющей поверхности в условиях больших выборок и её свойства // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т.39, №1-2. С. 300–304.
11. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры смеси непараметрических оценок плотности вероятности многомерной случайной величины // Системы управления и информационные технологии. 2011. Т.43, №1. С. 12–15.
12. Лапко А. В., Лапко В. А. Свойства непараметрической оценки плотности вероятности многомерных случайных величин в условиях больших выборок // Информатика и системы управления. 2012. Т.32, №2. С. 121–126.
13. Лапко В. А., Капустин А. Н. Синтез нелинейных непараметрических решающих правил в задачах распознавания образов // Автотририя. 2006. Т. 42, № 6. С. 26–33.

### References

1. Bolshev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Mathematical statistics tables]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 416 p. (In Russ.)
2. Pugachev V. S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 496 p. (In Russ.)
3. Lapko A. V., Lapko V. A. [Nonparametric pattern recognition algorithms in the task of testing the statistical hypothesis of the identity of two laws of the distribution of random variables]. *Avtometriya*, 2010, Vol. 46, No. 6, p. 47–53. (In Russ.)
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Analysis of nonparametric pattern recognition algorithms under incomplete data. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, Vol. 44, No. 3, p. 238–244.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Synthesis of the structure of a family of nonparametric decision functions in the pattern recognition problem. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, Vol. 47, No. 4, p. 382–387.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable. *Measurement Techniques*, 2016, Vol. 59, No. 2, p. 122–126.
7. 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 (In Russ.)
8. Lapko A. V., Lapko V. A., Egorochkin I. A. [Nonparametric estimates of a mixture of probability densities and their application in the problem of pattern recognition]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2009, Vol. 35, No. 1, p. 60–64. (In Russ.)
9. Lapko A. V., Lapko V. A. [A collective of nonparametric solving functions in a two-alternative pattern recognition problem]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2009, Vol. 37, No. 3-1, p. 156–160. (In Russ.)
10. Lapko A. V., Lapko V. A. [Nonparametric estimation of the separating surface equation in conditions of large samples and its properties]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2010, Vol. 39, No. 1-2, p. 300–304. (In Russ.)
11. Lapko A. V., Lapko V. A. [Synthesis of the structure of a mixture of nonparametric estimates of the probability density of a multidimensional random variable]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, 2011, Vol. 43, No. 1, p. 12–15. (In Russ.)
12. Lapko A. V., Lapko V. A. [Properties of nonparametric estimation of the probability density of multidimensional random variables in conditions of large samples]. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2012, Vol. 32, No.2, p. 121–126. (In Russ.)
13. Лапко В. А., Капустин А. Н. [Synthesis of nonlinear nonparametric decision rules in pattern recognition problems]. *Avtometriya*, 2006, Vol. 42, No. 6, p. 26–33. (In Russ.)

УДК 528.88, 630

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ХАКАСИИ В 21 ВЕКЕ

А. В. Никитин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: gev\_130@mail.ru

*В настоящей работе приведены результаты геоинформационного анализа динамики усыхания темнохвойных лесов на территории Республики Хакасия в период с 2001 по 2021 года, а также сделан анализ влияния климата на темнохвойные древостои.*

*Ключевые слова: Республика Хакасия, дистанционное зондирование, темнохвойные леса.*

## GEOINFORMATIONAL ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF DARK CONIFEROUS FORESTS OF KHAKASSIA IN THE 21st CENTURY

A. V. Nikitin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gev\_130@mail.ru

*In this paper, the results of geoinformation analysis of the dynamics of dark coniferous forests on the territory of the Republic of Khakassia from 2001 to 2021 are represented, as well as an analysis of the impact of climate on dark coniferous stands was carried out.*

*Keywords: The Republic of Khakassia, remote sensing, dark coniferous forests.*

**Введение.** Данные дистанционного зондирования активно начали использовать для изучения лесов, начиная со второй половины 20-го века. Одной из основных задач, решаемых методами ДЗЗ относится изучение и картографирование негативных процессов, воздействующих на лесные массивы: влияния вредителей и болезней, иссушения или переувлажнения лесов, приводящих к их деградации и гибели [1].

Методы дистанционного зондирования Земли в совокупности с геоинформационными технологиями позволяют количественно оценить динамику лесных территорий. Целью данного исследования являлась оценка динамики усыхания темнохвойных лесов на территории Республики Хакасия на основе продуктов космической съемки MCD64A1 (MODIS) [2] и lossyear (Landsat, Global Forest Change) [3].

**Объект исследования.** На исследуемой территории анализировалось усыхание темнохвойных древостоев таких как сибирский кедр, пихта, ель. Республика Хакасия расположена в двух котловинах равнинного типа – Хакасско-Минусинская и Чулымо-Енисейская. С западной стороны территория прикрыта нагорьем Кузнецкого Алатау с вершиной Верхний Зуб высотой 2178 метров и склонами Абаканского хребта, не превышающего в высоту 1984 метра. С юго-восточной стороны территория ограничена склонами хребта Западных Саян с горой Карагош достигающей высоты 2930 метров. Преобладающий рельеф местности – степи, горы и тайга. Две третьих территории имеют гористую поверхность – Саянские горы, остальная треть занята холмами и равнинами, которые прилегают к речным долинам рек Енисея и Абакана [4].

Площадь объекта исследования составляет 61 900 км<sup>2</sup>. Климат на территории республики характеризуется, как резко континентальный с жарким летом и холодной зимой. Средняя температура воздуха июля +17,9°C, января –18,9°C.

**Материалы.** Производился анализ на основе данных спутниковой съемки: Global Forest Change – карта потери лесного покрова; MCD64A1 со спутника MODIS – данные потери древостоев, связанных с пожарами; CRU TS – климатические данные [5].

**Результаты.** Выявлена площадь утраченных темнохвойных лесов, равная 11963 квадратных километров. На долю пожаров приходится менее 0,1% от общей площади исчезнувшего леса, что составляет 9,4 квадратных километра. Наибольшая площади исчезновения лесных участков пришлась

на 2015–2021 год (см. рисунок). Таким образом, в последние года наблюдается значимый рост площади усыхания темнохвойных пород на исследуемой территории.



График динамики исчезновения темнохвойного леса

Взаимосвязь температур с учетом влияния предыдущего года на пожары найдена в январе, феврале, июле и декабре, коэффициенты корреляции равны 0,63, 0,49, 0,52 и 0,57 соответственно. Из этого следует, что увеличение показателей температур этих месяцев способствует возникновению пожаров.

Влияние осадков текущего года выявлено в январе и июле, коэффициенты соответственно равны – 0,52 и –0,53. На основе этого можно сделать вывод о том, что уменьшение осадков в этих месяцах за период 2001–2021 годов способствовало увеличению площади пораженных древостоев пожарами.

Также была выявлена связь уменьшения количества апрельских осадков в исследуемых временных границах на площади погибших древостоев. В этом случае коэффициент корреляции Пирсона был равен –0,53. Делая заключительный вывод о работе, можно сказать, что данные дистанционного зондирования позволяют анализировать динамику исчезновения темнохвойных древостоев.

### Библиографические ссылки

1. Компания «Совзонд» [Электронный ресурс]. URL: <https://sovzond.ru/industry-solutions/forestry/> (дата обращения: 04.09.2022).
2. Earthdata [Электронный ресурс]. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (дата обращения: 07.09.2022)
3. Global Forest Change [Электронный ресурс]. URL: <https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html> (дата обращения: 07.09.2022)
4. Система обмена туристической информацией [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nbcrs.org/regions/respublika-khakasiya/klimat> (дата обращения: 05.09.2022)
5. CRU Data [Электронный ресурс]. URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> (дата обращения: 08.09.2022).

### References

1. Kompanija «Sovzond». Available at: <https://sovzond.ru/industry-solutions/forestry/> (accessed 04.09.2022).
2. Earthdata. Available at: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (accessed 07.09.2022)
3. Global Forest Change. Available at: <https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html> (accessed 07.09.2022)
4. Sistema obmena turisticheskoj informaciej. Available at: <https://www.nbcrs.org/regions/respublika-khakasiya/klimat> (accessed 05.09.2022)
5. CRU Climate Data. Available at: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> (accessed 08.09.2022).

УДК 528.88 528.94

## РАЗРАБОТКА ТУРИСТИЧЕСКОЙ КАРТЫ-СХЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС ТЕХНОЛОГИЙ

Е. Е. Перевозчикова, Е. П. Соколов, Е. А. Охоткина\*

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

\*E-mail: y.evgenia@mail.ru

*Целью данной работы является разработка туристической карты-схемы Йеллоустонского заповедника и древнего города Мачу-Пикчу с применением ГИС технологий.*

*Ключевые слова: обработка данных дистанционного зондирования, карта, туризм, спутники LANDSAT, ГИС проект, спутниковые снимки.*

## DEVELOPMENT OF A TOURIST MAP-SCHEME USING GIS TECHNOLOGIES

E. E. Perevozchikova, E. P. Sokolov, E. A. Okhotkina\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: y.evgenia@mail.ru

*The purpose of this work is to develop a tourist map-scheme of the Yellowstone Nature Reserve and the ancient city of Machu Picchu using GIS technologies.*

*Keywords: remote sensing data processing, map, tourism, LANDSAT satellites, GIS project, satellite images.*

В последнее время ГИС технологии находят все большее применение в туристической индустрии, позволяя тем самым систематизировать территориально распределенную информацию, переходя от решения глобальных задач к частным. Такие инструменты, как пространственное моделирование и принятие решений, геоанализ данных позволяют не только проектировать туристические зоны отдыха, но также рассматривать возможность их реализации не нарушая экологической обстановки окружающей среды. В сфере туризма большей популярностью пользуются карты-схемы. Мы используем ее интуитивно, даже не задумываясь. Объясняется это тем, что карта-схема проста и удобна. Она помогает нам ориентироваться на местности без лишних картографических сеток, высот рельефа и другой информации, которую может быть сложно прочесть неопытному туристу.

Содержание карты-схемы строго ограничено элементами, важными для понимания её сюжета. Схематизм изображения позволяет получить в наглядной форме общее представление о показанной на картосхеме территории и подчеркнуть ее существенные черты. Разработка таких видов карт является перспективным направлением в туристической картографии [1].

Йеллоустонский национальный парк представляет собой международный биосферный заповедник, объект Всемирного Наследия ЮНЕСКО, первый в мире национальный парк. Находится в США, на территории штатов Вайоминг, Монтана и Айдахо. Парк знаменит многочисленными гейзерами и другими геотермическими объектами, богатой живой природой, живописными ландшафтами. Площадь парка – 898,3 тысяч гектар [2].

Мачу-Пикчу – древний город Инков и всемирное наследие в Южной Америке, находящийся на территории современного Перу, на вершине горного хребта на высоте 2400 метров над уровнем моря, господствующего над долиной реки Урубамбы. В 2007 году удостоен звания Нового чуда света.

Для создания карт-схем туристических объектов были использованы спутниковые снимки с бесплатного электронного ресурса USGS, а также навигационной программы SAS.Планет.

При векторизации космических снимков для создания картосхем использовался комплекс геоинформационных программ ArcGIS | ArcMap. Он предназначен для создания и использования карт, компиляции географических данных, анализа картографической информации, создания и использования карт и географической информации, а также управления географической информацией в базе данных.

Для векторизации спутниковых снимков была создана персональная база геоданных, в которую добавлялись классы площадных, линейных и точечных объектов [3].

На следующем этапе для векторизации снимков был применен инструмент Редактор. Затем на векторизированный слой были нанесены условные обозначения известных туристических объектов [4]. Добавив к картам легенду, получили финальный результат (рис. 1, 2) [5].



Рис. 1. Итоговая карта-схема Йеллоустонского заповедника с легендой

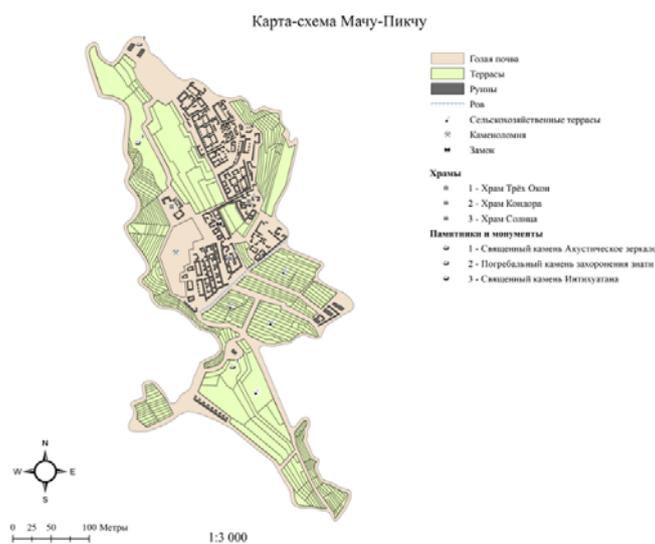


Рис. 2. Итоговая карта-схема древнего города Мачу-Пикчу с легендой. Таким образом, использование картосхем в сфере туризма весьма удобно и полезно, поскольку карты-схемы позволяют быстро получить самую необходимую географическую и тематическую информацию о местности

Карты-схемы помогают планировать и осуществлять путешествия. В случае использования карты-схемы Йеллоустонского заповедника можно узнать, где найти ближайший отель или как добраться до интересного природного объекта. С помощью картосхемы Мачу-Пикчу турист может визуально ознакомиться с планом города и узнать расположение исторических достопримечательностей.

### **Библиографические ссылки**

1. Аржанов Е. П. Туристские карты в системе картографических произведений / Е. П. Аржанов // Геодезия и картография, 1990. С. 37–40.
2. Краснов, А. Н. Йеллоустонский парк // Профессор Андрей Николаевич Краснов / Сб. под ред. прив.-доц. Харьковского ун-та В. И. Талиева. Харьков: Тип. Сергеева, 1916. С. 203–214.
3. Им С. Т. Руководство по выполнению курсовой работы по дисциплине «Геоинформационные системы и технологии» // Векторизация топографической карты средствами программного пакета ESRI ARCGIS. 2014. С. 6–43.
4. Ахметов Р. Ш. Основы мелкомасштабного тематического картографирования в ArcGIS / Р. Ш. Ахметов; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург : ОГУ, 2010. С. 21–35.
5. Лыгин А. Н. Методические указания по оцифровке растра в ArcGIS 9.3. М.: МИИГАиК, 2015. С. 3–11.

### **References**

1. Arzhanov E. P. Turistskie karty v sisteme kartograficheskikh proizvedenij / E. P. Arzhanov // Geodeziya i kartografiya, 1990. P. 37–40.
2. Krasnov, A. N. Jelloustoniskij park // Professor Andrej Nikolaevich Krasnov / Sb. pod red. priv.-doc. Har'kovskogo un-ta V. I. Talieva. Har'kov: Tip. Sergeevna, 1916. P. 203–214.
3. Im S. T. Rukovodstvo po vypolneniyu kursovoj raboty po discipline «Geoinformacionnye sistemy i tekhnologii» // Vektorizaciya topograficheskoy karty sredstvami programmnoho paketa ESRI ARCGIS. 2014. P. 6–43.
4. Ahmetov R. Sh. Osnovy melkomasshtabnogo tematiceskogo kartografirovaniya v ArcGIS / R. Sh. Ahmetov; Orenburgskij gos. un-t. Orenburg : OGU, 2010. P. 21–35.
5. Lygin A. N. Metodicheskie ukazaniya po ocifrovke rastra v ArcGIS 9.3. M.: MIIGAiK, 2015. P. 3–11.

© Перевозчикова Е. Е., Соколов Е. П., Охоткина Е. А., 2022



**Секция**  
**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 531.2

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ КРЫЛА ЭКРАНОПЛАНА НА ЕГО СВОЙСТВА

М. А. Андреев\*, С. Д. Шелопугин, П. Р. Чирков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: mishaandreev20115656@gmail.com

*В самолетостроении применяются различные профили крыла. Для поддержания продольной устойчивости в конструкции экранопланов применяются 2 схемы профилей крыла: «самолетная» схема, схема Липпиша.*

*Ключевые слова: профиль крыла, подъемная сила, хорда.*

## THE INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE WING PROFILE OF THE EKRAANOPLANE ON ITS PROPERTIES

M. A. Andreev\*, S. D. Shelopugin, P. R. Chirkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mishaandreev20115656@gmail.com

*Various wing profiles are used in aircraft construction. To maintain longitudinal stability in the design of ekranoplanes, 2 wing profile schemes are used: the "airplane" scheme, the Lippish scheme.*

*Keywords: wing profile, lift, chord.*

Изобретение относится к транспортным средствам на динамической воздушной подушке и касается создания экранопланов.

Экраноплан «самолетной» схемы, показанный на рис. 1, имеет фюзеляж, на котором установлено крыло малого удлинения прямоугольной формы в плане. В хвостовой части установлены два вертикальных оперения со стабилизатором и двигателями, состыкованные на торцах вертикальных оперений. Центр масс экраноплана, находящийся впереди центра давления крыла малого удлинения, расположен в зоне значения параметров и, обеспечивающих экраноплану устойчивость на всех высотах полета над экраном и вдали от экрана, поддерживаемая системой автоматического поддержания продольной устойчивости. Для экраноплана «самолетной» схемы используется выпукло-вогнутое крыло.



Рис. 1. Экраноплан «Самолетной схемы»

Аппараты, выполненные по схеме Липпиша – близкой к «самолетной» схеме, но с треугольным в плане крылом обратной стреловидности и менее развитым, чем у самолетной схемы, хвостовым оперением (находящимся частично в зоне потока от двигателей) показали на испытаниях хорошие результаты. Крыло данной формы имеет S-образный профиль и обеспечивает достаточно стабильное нахождение фокуса по высоте впереди фокуса по углу атаки, что удовлетворяет основному критерию продольной устойчивости экраноплана. При этом такое крыло имеет удовлетворительные аэродинамические характеристики. [1-3]

**Анализ влияния формы профиля на аэродинамические характеристики крыла вблизи экрана.** Полет экраноплана осуществляется на малой относительной высоте  $\bar{h} = h/b$  (здесь  $h$  – высота над поверхностью экрана, отсчитываемая от задней кромки крыла;  $b$  – хорда крыла) с тем, чтобы максимально использовать благоприятный эффект экранирующей поверхности. При полете на малом расстоянии от экрана существенно возрастает роль профиля крыла экраноплана. Это связано с тем, что расстояние до экрана соизмеримо с толщиной  $s$  или вогнутостью  $f$  крыла, и поэтому небольшие изменения в геометрии профиля, которые в неограниченном потоке не приводят к заметным изменениям аэродинамических характеристик крыла, вблизи экрана могут существенно изменить характер обтекания.

При решении вопросов устойчивости экраноплана существенное значение имеют характеристики устойчивости крыла. Анализ линеаризованных уравнений возмущенного движения экраноплана, проведенный в работе показал, что устойчивость экраноплана в короткопериодическом движении определяется критерием, предъявляющим особые требования к аэродинамической компоновке ЛА. Для оценки характера возмущенного движения наряду с фокусом по углу атаки  $F_\alpha$ , как показано на рис. 2, следует рассматривать фокус по высоте над экраном  $F_h$ . Для обеспечения статической устойчивости экраноплана в соответствии с критерием Иродова, кроме выбора соответствующей центровки, необходимо, чтобы фокус по высоте  $F_h$  над экраном находился впереди фокуса по углу атаки  $F_\alpha$ . У большинства аэродинамических профилей с приближением к экрану  $F_h$  смещается к задней кромке и находится позади  $F_\alpha$ . С учетом критерия Иродова появляется возможность с помощью изменения формы профиля управлять положением этих фокусов. Параметрический анализ экспериментальных данных позволяет установить ряд закономерностей влияния толщины и кривизны профиля крыла на расположение его фокусов. При определении характеристик устойчивости расстояние от экрана отчитывалось от точки, расположенной на середине хорды крыла, что соответствует возможному расположению центра масс экраноплана.

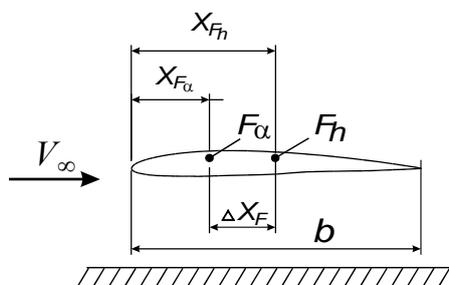


Рис. 2. Расположение аэродинамических фокусов по углу атаки  $F_\alpha$  и по высоте над экраном  $F_h$

Результаты анализа экспериментальных данных показывают, что в отношении подъемной силы влияние толщины крыла вблизи экрана сказывается более существенно, чем в неограниченном полете. Существенно зависит от толщины крыла приращение подъемной силы, вызванное близостью экрана. На рис. 3 показана зависимость приращения коэффициента подъемной силы  $C_u$  при уменьшении  $\bar{h}$  от 0.3 до 0.1. Видно, что увеличение толщины крыла приводит к уменьшению положительного влияния экрана на подъемную силу, примерно на 40 %.

Основной целью анализа работ было выявление особенностей влияния формы адаптирующегося профиля на аэродинамическое качество крыла вблизи экрана. На рис. 3 приведены зависимости максимального аэродинамического качества  $K_{\max}$  от вогнутости профиля  $\bar{f}$ . Как видно, с приближением крыла к экрану на малое расстояние влияние вогнутости профиля на аэродинамическое качество усиливается. Например, значение  $K$  при  $C_y = 0.5$  у такого крыла существенно уменьшается при отходе от экрана, предотвращая уход крыла с заданного режима полета. Зависимости  $K_{\max}$  и  $K_{C_y = 0.5}$  от толщи-

ны крыла. Из нее следует, что при малой вогнутости ( $\bar{f}=1\%$ ) с увеличением толщины уменьшается  $K_{\max}$ .

Зависимость расстояния между фокусами  $\Delta x_F = x_{Fh} - x_{Fa}$  от толщины и вогнутости профиля для различных значений  $\bar{h}$ . В соответствии с критериями апериодической устойчивости знак при  $x_F$  определяет характер возмущенного движения ЛА. У крыла, имеющего малую  $\bar{c}$ , фокус  $F_a$  находится впереди  $F_h$ . С увеличением  $\bar{c}$  и отходом от экрана расстояние между фокусами уменьшается.

$\bar{f}$	5	5	3	1	1
$\bar{h}$	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4
№	1	2	3	4	5

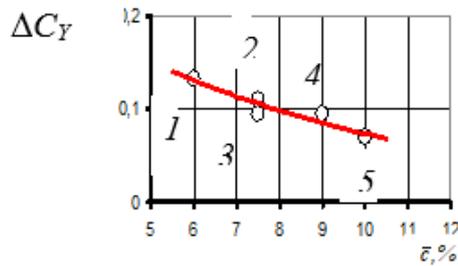


Рис. 3. Зависимость  $C_Y$  от  $\bar{c}$  при изменении  $\bar{h}$  и  $\bar{f}$

Анализ экспериментальных данных показывает возможность реализации крыла с адаптивной нижней поверхностью, в обеспечении предотвращения ухода экраноплана с заданного режима, путем уменьшения подъемной силы крыла при адаптации его профиля.

Для достижения  $K_{\max}$ , на основных режимах полета  $\bar{h} = 0.1 - 0.2$ , необходимо иметь исходный профиль малой относительной толщины ( $\bar{c}=6\%$ ) и кривизны ( $\bar{f} = 1\%$ ) с углами установки крыла  $\alpha_{уст}$  при  $C_y = 0.4; 0.5, 0.6$  профиля.

Переход к профилям малой кривизны приводит к необходимости применения двояковыпуклых профилей, у которых при малых углах атаки проявляется эффект трубки Вентури (эффект подсасывания), уменьшающий положительный эффект экрана, что ограничивает возможности использования таких профилей.

Анализ экспериментальных данных исследования S-образных крыльев в режиме адаптации показывает, что здесь существенно усиливается влияние экрана на расположение фокусов. При определенном расстоянии  $\bar{h}$  фокус  $F_h$  оказывается впереди  $F_a$ . Применение адаптирующихся S-образных крыльев, с их удовлетворительными аэродинамическими характеристиками, предпочтительно с точки зрения обеспечения критерия статической устойчивости.

Реализовать возможность управления положением аэродинамических фокусов по высоте над экраном  $x_{Fh}$  и по углу атаки  $x_{Fa}$  позволяет крыло экраноплана, обеспечивающее получение закона изменения давлений под крылом  $P_a$  и статического давления в крыле  $P_{ст}$  с гибкой нижней оболочкой, подкрепленной упругими латами на изменение геометрии профиля крыла, определяющего аэродинамические параметры вблизи экрана. В полете вблизи экрана разность давлений, в крыле и под ним, обеспечивает исходную форму профиля крыла с его исходными аэродинамическими параметрами. С отходом от экрана  $P_{ст}$  становится больше  $P_a$  и упругости формообразующих лат  $F_{л}$ . Равновесие этих параметров обеспечивается изменением формы профиля (адаптацией) с соответствующим изменением аэродинамических параметров профиля, что предотвращает увеличение высоты полета над поверхностью экрана и уход экраноплана с заданного режима полета.

Зависимость распределения давления по нижней поверхности крыла от высоты полета, показанная на рис. 4, позволяет определить величину управляющего усилия (распределенной нагрузки), действующего как разница давлений в крыле и под крылом на его элементы, что дает возможность рассчитать конструкцию адаптивного крыла. [4-5]

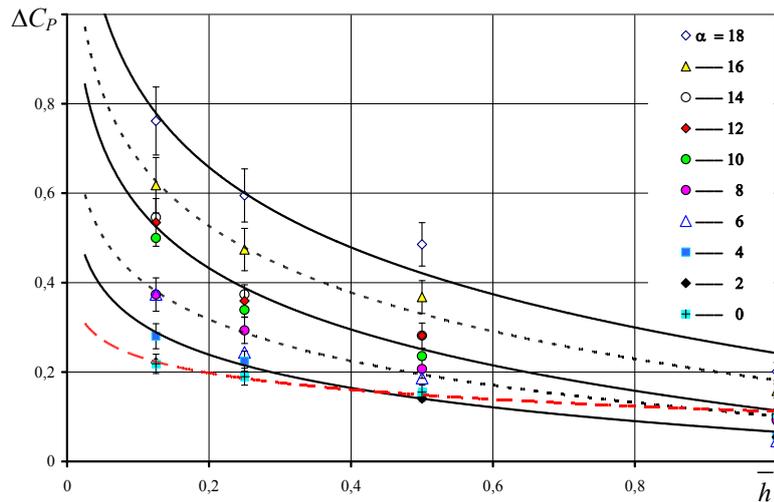


Рис. 4. Изменение давления  $C_p$  на пластине в центре тяжести  $x_{ЦГ}$ , при движении вблизи твердой стенки на различных углах атаки  $\alpha$

### Библиографические ссылки

1. Удивительные самолеты Александра Липпиша [Электронный ресурс]. URL: [https://nik191-1.ucoz.ru/publ/voennaja\\_ttehnika/aviacija/udivitelnye\\_samolety\\_aleksandra\\_lippisha/17-1-0-3577](https://nik191-1.ucoz.ru/publ/voennaja_ttehnika/aviacija/udivitelnye_samolety_aleksandra_lippisha/17-1-0-3577) (дата обращения: 26.08.2022).
2. Lippisch Storch V Уголок неба [Электронный ресурс]. URL: <http://www.airwar.ru/enc/xplane/storch5.html> (дата обращения: 26.08.2022).
3. Летательный аппарат будущего от Александра Липпиша [Электронный ресурс]. URL: <https://youroker.livejournal.com/56665.html> (дата обращения: 26.08.2022).
4. Влияние геометрических характеристик и кинематических параметров движения на аэродинамику крыла вблизи экрана [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskih-harakteristik-i-kinematicheskikh-parametrov-dvizheniya-na-aerodinamiku-kryla-vblizi-ekrana/viewer> (дата обращения: 27.08.2022).
5. Расчет аэродинамических характеристик профиля вблизи экрана при заданных значениях его геометрических параметров [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-aerodinamicheskikh-harakteristik-profilya-vblizi-ekrana-pri-zadannyh-znacheniyah-ego-geometricheskikh-parametrov/viewer> (дата обращения: 28.08.2022).

### References

1. Alexander Lippish's amazing planes. Available at: [https://nik191-1.ucoz.ru/publ/voennaja\\_ttehnika/aviacija/udivitelnye\\_samolety\\_aleksandra\\_lippisha/17-1-0-3577](https://nik191-1.ucoz.ru/publ/voennaja_ttehnika/aviacija/udivitelnye_samolety_aleksandra_lippisha/17-1-0-3577) (accessed 26.08.2022).
2. Lippisch Storch V Corner of the sky. Available at: <http://www.airwar.ru/enc/xplane/storch5.html> (accessed 26.08.2022).
3. The aircraft of the future by Alexander Lippish. Available at: <https://youroker.livejournal.com/56665.html> (accessed 26.08.2022).
4. The influence of geometric characteristics and kinematic parameters of motion on the aerodynamics of the wing near the screen. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskih-harakteristik-i-kinematicheskikh-parametrov-dvizheniya-na-aerodinamiku-kryla-vblizi-ekrana/viewer> (accessed 27.08.2022).
5. Calculation of the aerodynamic characteristics of the profile near the screen at specified values of its geometric parameters. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-aerodinamicheskikh-harakteristik-profilya-vblizi-ekrana-pri-zadannyh-znacheniyah-ego-geometricheskikh-parametrov/viewer> (accessed 28.08.2022).

УДК 629.73

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДЯНОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЕТА EMBRAER 170

А. В. Афанасьева, Е. Е. Сяков, В. Е. Сяков

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 рамках данной статьи приведены рекомендации по модернизации водяной системы самолета бразильского производства Embraer 170.*

*Ключевые слова: летная годность, воздушное судно, компрессор, водяная система.*

## MODERNIZATION OF THE WATER SYSTEM OF THE EMBRAER E-170

A. V. Afanaseva, E. E. Siakov, V. E. Siakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tupolev5k@gmail.com

*Within the framework of this article, recommendations are given for the modernization of the water system of the Brazilian-made Embraer 170 aircraft.*

*Keywords: airworthiness, aircraft, compressor, water system.*

Во время технического обслуживания (ТО) любого типа воздушного судна (ВС) возникают свои проблемы, не исключением является и E-170. Данный самолет, как и любой другой, оборудован водяной системой (рис. 1) для обеспечения комфортных условий в полете [1].

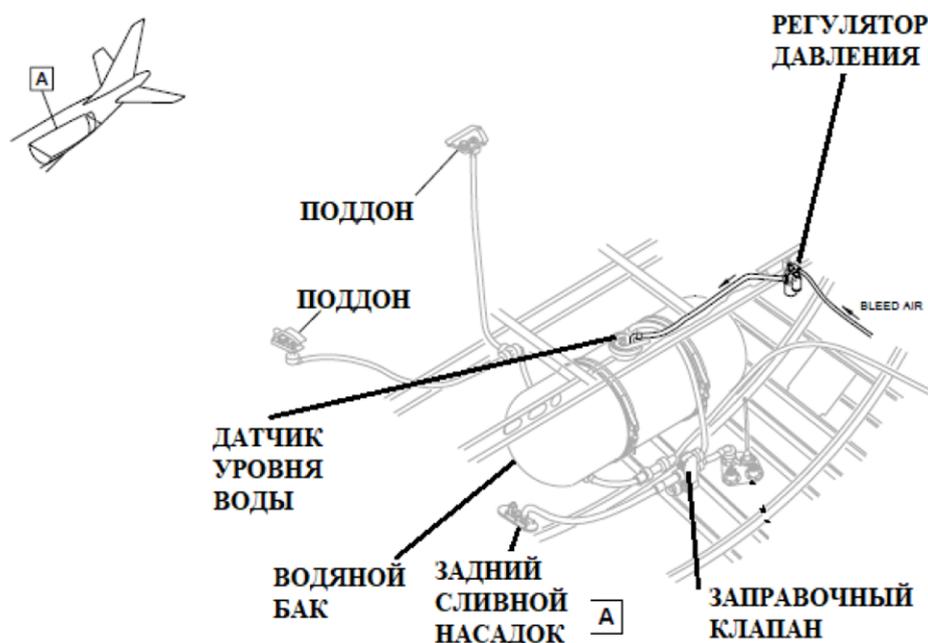


Рис. 1. Структурная схема водяной системы самолета E-170

Одна из возникающих проблем при эксплуатации данного типа ВС примерзание водяной системы (рис. 2). Вода замерзает в трубах, что приводит к непроходимости в них воды или даже разрушению. Разрушенный трубопровод служит причиной водяных утечек, которые могут нести серьезные последствия. В частности, 28.12.2019 при подготовке ВС Embraer 170 VQ-BYL к рейсу № 5335 по маршруту Новосибирск – Новый Уренгой командир воздушного судна обнаружил о заклинивании штурвала при перемещении его в канале крена. При выполнении поиска неисправности обнаружено образование льда за передней стенкой переднего багажного отделения вдоль тросовой проводки управления элеронов, которое привело к заклиниванию управления воздушного судна по крену.



Рис. 2. Пример следствия примерзания водяной системы

Вторая проблема возникает при техническом обслуживании самолета в ангаре. Невозможно обеспечить водяную систему сжатым воздухом без запуска вспомогательной силовой установки (ВСУ) [2].

В целях поддержания экономической и технологической эффективности эксплуатации [3] самолета E-170 предложены следующие варианты решения данных проблем:

1. Установка теплоизоляции на трубы.
2. Установка штуцера для наддува и компрессора.

В качестве возможного варианта решения первой проблемы предложено установить теплоизоляционный материал на трубы – пенополиэтилен марки MP15FR (рис. 3).

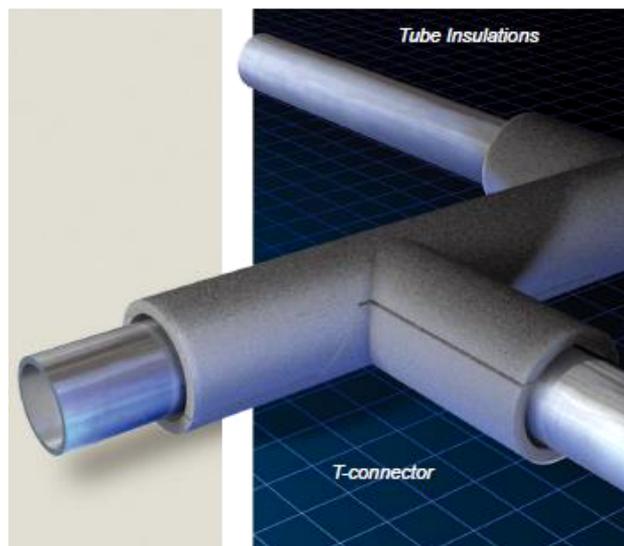


Рис. 3. Теплоизоляционный элемент

Для решения второй проблемы предлагается установить специальный штуцер совместно с компрессором.

Система будет работать следующим образом, при подключении внешнего источника сжатого воздуха, воздух через обратный клапан идет к челночному клапану, который выбирает данный источник в качестве приоритетного, так как в линии компрессора нет давления. Затем воздух идет к регулятору давления и в водяной бак [4-5].

Если включить компрессор система будет работать по-другому. Воздух будет идти к челночному клапану, который выбирает данный источник в качестве приоритетного, так как в линии наземного источника нет давления, после клапана воздух идет к регулятору давления и в водяной бак.

Любое изменение типовой конструкции требует обязательной сертификации, согласно авиационным правилам EASA CS-25, ФАП АП-25.

#### **Библиографические ссылки**

1. Каталог составных частей самолёта Embraer E170: ревизия 148 от 3 сентября 2021.
2. Руководство по технической эксплуатации самолёта Embraer E170: ревизия 85 от 27 августа 2021.
3. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: учебник. М.: МГТУ ГА, 2015. 579 с.
4. Пивоваров В.А. Повреждаемость и диагностирование авиационных конструкций. Учебник. М.: Транспорт, 1994.-204 с.
5. Надёжность авиационной техники и безопасность полётов / Снисаренко С.И., Герашенко В.С., Подружин Е.Г. и др. // Учебное пособие. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2008.- 227 с.

#### **References**

1. Aircraft illustrated parts catalogue Embraer E170: rev.148 3 Sep. 2021.
2. Aircraft maintenance manual Embraer E170: rev.85 27 Aug. 2021.
3. Smirnov N. N., Chinyuchin Yu. M. Fundamentals of the theory of technical operation of aircraft: teacher. M.: MGTU GA, 2015. 579 p.
4. Pivovarov V.A. Damage and diagnostics of aircraft structures. Textbook.-M.: Transport, 1994.-204 p.
5. Reliability of aviation equipment and flight safety / Snisarenko S.I., Gerashchenko V.C., Druzhin E.G. et al. // Textbook. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2008.- 227 p.

© Афанасьева А. В., Сяков Е. Е., Сяков В. Е., 2022

УДК 629.73

## АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АВИАКОМПАНИИ «S7 AIRLINES» В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

А. В. Афанасьева, Е. Е. Сяков, В. Е. Сяков

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 рамках данной статьи проведен анализ деятельности авиакомпании «S7 Airlines» в современных условиях. Выбранная тема исследования обусловлена необходимостью обеспечения правильности принимаемых решений с целью повышения эффективности работы авиакомпании.*

*Ключевые слова: стоимость летного часа, стоимостные характеристики эксплуатации, анализ деятельности, экономическая эффективность.*

## ANALYSIS OF THE ACTIVITIES OF THE AVIATION COMPANY «S7 AIRLINES» IN MODERN CONDITIONS

A. V. Afanaseva, E. E. Siakov, V. E. Siakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tupolev5k@gmail.com

*Within the framework of this article, an analysis of the activities of «S7 Airlines» in modern conditions is carried out. The chosen research topic is due to the need to ensure the correctness of decisions made in order to improve the efficiency of the airline.*

*Keywords: cost of a flight hour, cost characteristics of operation, analysis of activities, economic efficiency.*

Авиационный транспорт занимает доминирующее место в перевозках пассажиров на расстояния свыше 500 км. В связи с большой популярностью авиаперевозок в России насчитывается большое количество авиакомпаний, однако не все из них остаются востребованными, и часть перевозчиков уходит с рынка по причине нерентабельности.

«S7 Airlines» – крупнейшая частная авиакомпания России, стабильно работает на рынке уже 30 лет. За эти годы авиакомпания пережила как успехи, так и трудности. Самые непредсказуемые из них наблюдались в период с начала 2019 года по март 2022 года.

Авиационный флот авиакомпании состоит из экономичных и эффективных самолетов, таких как: Airbus 320 Family, Boeing 737NG и Embraer 170 [1].

Авиакомпания создала хорошие транспортные узлы, которые находятся в Центральной, Южной и Сибирской частях России [2]. Такие узлы позволяют охватывать западные и восточные направления, а именно 181 город в 26 странах мира (до наступления мирового кризиса в 2022 году).

Все самолеты авиакомпании проходят плановое техническое обслуживание в организации по техническому обслуживанию и ремонту «S7 Technics». Крупные авиационные базы по техническому обслуживанию и ремонту находятся в г. Москва, г. Новосибирск и г. Минеральные воды, что позволяет быстро и качественно производить работы.

Для проведения анализа деятельности авиакомпании «S7 Airlines» за период 2019-2022 гг в достаточной степени необходимо произвести расчеты стоимости летного часа для всех типов воздушных судов, эксплуатирующихся в авиакомпании [3-4].

Для это воспользуемся формулами (1,2), приведёнными ниже.

$$S_{лч} = P_{пр} + P_{кос}, \quad (1)$$

где  $P_{пр}$  – прямые расходы,  $P_{кос}$  – косвенные расходы.

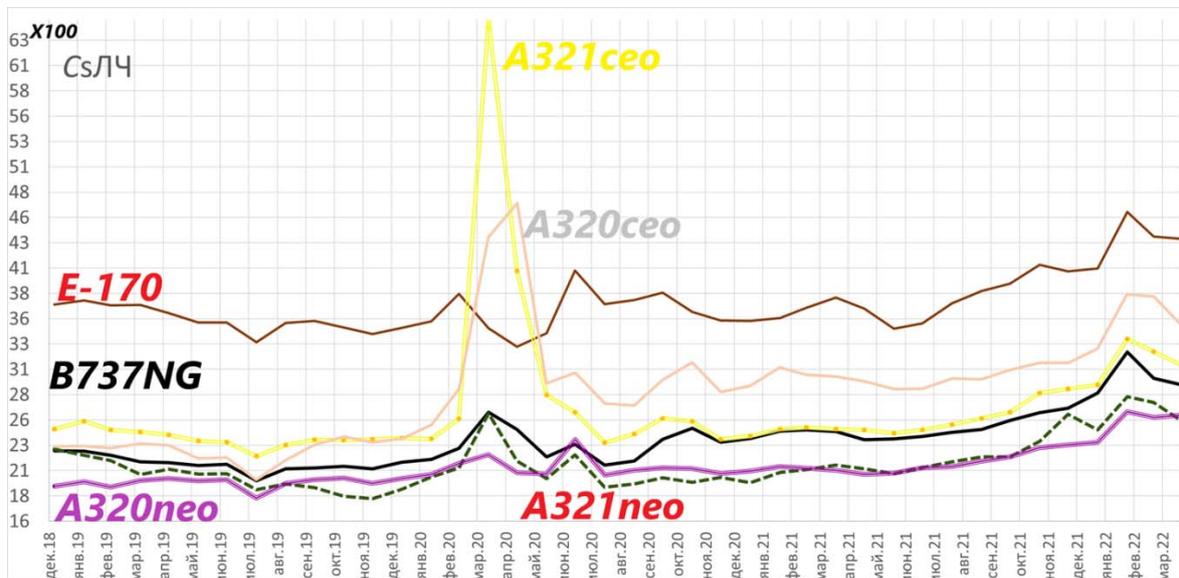
Прямые расходы – это затраты на совершение всех необходимых операций для создания и выполнения летного задания. Данные расходы состоят из: 1) расходы на горюче-смазочные материалы; 2) амортизационные отчисления по планеру с оборудованием и двигателями; 3) расходы на техническое обслуживание; 4) расходы по заработной плате летного состава; 5) расходы на социальное страхование; 6) аэропортовые сборы; 7) аэронавигационные сборы; 8) прочие прямые летные расходы.

Косвенные расходы включают: 1) наземные расходы в аэропортах и представительствах авиакомпании; 2) расходы по обслуживанию пассажиров; 3) расходы по продаже, оформлению перевозок и реклам; 4) накладные и административные расходы. В расчётах принимаем 40% от прямых расходов.

Для проведения относительно реальной оценки необходимо рассчитать значения стоимости летного часа на пассажирское место. Для этого необходимо стоимость летного часа разделить на количество кресел в рассматриваемом воздушном судне.

$$C_{Стч} = \frac{S_{лч}}{Ч_n}. \quad (2)$$

Полученные в результате использования данной модели стоимости летного часа сведены в общий график по месяцам (см. рисунок), показывают вероятностный характер и имеют определенный уровень погрешности, связанный с прогнозными значениями ряда показателей, используемых в модели.



Зависимость изменения стоимости летного часа на одно кресло от рассматриваемого времени эксплуатации

Анализ деятельности авиакомпании «S7 Airlines» за период с января 2019 года по апрель 2022 года показывает, что [5]:

1. Несмотря на сложные форс-мажорные обстоятельства авиакомпания справляется со сложностями. Об этом свидетельствует восстановление кривых на графике налета часов. Прежде всего авиакомпания сохранила авиапарк и авиационный персонал, об этом свидетельствуют наращивание объемов авиаперевозок с начала июня 2020 года.

2. Показано, что во время пандемии реализовался серьезный простой авиационной техники, что отражено в уменьшении количества летных часов.

3. Расчетным путем показано, что авиакомпания за этот период выполнила обновление своего флота вернув ВС лизингодателю и взяв новые, что отразилось на коэффициент исправности.

4. Показано, что за рассматриваемый период себестоимость лётного часа увеличилась в связи с увеличением стоимости керосина, однако авиакомпания не изменила стоимость авиабилетов сократив прочие расходы, что позволило ей остаться на конкурентном уровне.

5. Доказано, что несмотря на сложную политическую обстановку Авиакомпания развернула все заграничные направления в города и страны ближнего зарубежья, тем самым не допустила снижение налета ВС.

#### Библиографические ссылки

1. S7 Airlines. О компании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.s7.ru/ru/about/s7-airlines.dot> (дата обращения 07.11.2021).

2. Statdata.ru. Площадь Российской Федерации – 2022 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.statdata.ru/ploshchad/rossii> (дата обращения 16.11.2021).

3. Барзилович, Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. М.: Высшая школа, 1982. 232 с.

4. Емелин, Н. М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов / М. : Машиностроение, 1995. 128 с.

5. Сяков Е. Е. Анализ деятельности авиакомпании «S7 Airlines» в современных условиях: дис. магистра. Красноярск: СибГУ, 2022. 81 с.

#### References

1. S7 Airlines. About the company. Available at: <https://www.s7.ru/ru/info/o-kompanii/> (accessed 07.11.2021).

2. Statdata.ru. Area of the Russian Federation – 2022. Available at: <http://www.statdata.ru/ploshchad/rossii> (accessed 16.11.2021). Text: electronic.

3. Barzilovich, E. Y. Models of maintenance of complex systems / E. Y. Barzilovich. M.: Higher School, 1982. 232 p.

4. Emelin, N. M. Development of aircraft maintenance systems / M. : Mashinostroenie, 1995. 128 p.

5. Syakov E. E. Analysis of the activities of the airline «S7 Airlines» in modern conditions: dis. master's degree. Krasnoyarsk: SibSU, 2022. 81 p.

© Афанасьева А. В., Сяков Е. Е., Сяков В. Е., 2022

УДК 629.7.038

## АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ САМОЛЕТА МИГ-31БМ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ИСТРЕБИТЕЛЬНОГО АВИАЦИОННОГО ПОЛКА

Д. А. Идиятулин, С. С. Тришин, О. Г. Бойко, Е. А. Ачкасова

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

*Данная статья посвящена исследованию отказов и неисправностей силовой установки самолета МиГ-31БМ, проведен анализ надежности силовой установки, для поддержания высокой боевой готовности парка авиатехники истребительного авиационного полка.*

*Ключевые слова: поддержание высокой надежности, силовая установка, отказы и неисправности, статистические данные, техническое обслуживание.*

## ANALYSIS OF FAILURES AND MALFUNCTIONS OF THE AIRCRAFT POWER PLANT MIG-31BM ACCORDING TO THE STATISTICS OF THE FIGHTER AVIATION REGIMENT

D. A. Idiyatulin, S. S. Trishin, O. G. Boyko, E. A. Achkasova

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

*This article is devoted to the study of failures and malfunctions of the power plant of the MiG-31BM aircraft, the analysis of the reliability of the power plant, to maintain high combat readiness of the fleet of aircraft of the fighter aviation regiment.*

*Keywords: maintaining high reliability, power plant, failures and malfunctions, statistics, maintenance.*

**Введение.** Актуальностью данной работы является анализ обеспечения боеготовности самолета МиГ31 БМ за счет надежности силовой установки. Целью работы является исследование процесса изменения надежности в эксплуатации за счет особенностей технического обслуживания силовой установки самолета МиГ-31БМ, что в свою очередь, положительно скажется на поддержании высокой боевой готовности истребительного авиационного полка. Научная новизна работы заключается в том, что до настоящего времени не выполнялся анализ надежности по статистическим данным отказов и неисправностей силовой установки самолета МиГ-31БМ, за исключением закрытых научных учреждений оборонной направленности.

**Расчет надежности силовой установки.** Для достижения поставленной цели в данной работе решены следующие задачи:

- проведена работа по сбору статистических данных по отказам и неисправностям силовой установки в истребительном авиационном полку;
- выделены элементы силовой установки с повторяющимися отказами и рассчитаны параметры потоков отказов этих элементов;
- построена структурная схема надежности силовой установки;
- выполнен расчет безотказности силовой установки для периодичностей существующих форм технического обслуживания;
- проведено обобщение полученных результатов и сформированы выводы.

Силовая установка истребителя МиГ-31БМ состоит двух турбореактивных двухконтурных двигателей Д-30Ф6 с изолированными воздухозаборниками с внешним сжатием для каждого. Авиационный двигатель Д-30Ф6 был создан Пермским ОАО "Пермские моторы" в 1976 году для применения на истребителе МиГ-31/31Б/31БМ и Су-47 (Беркут) двигатель обладает форсажной тягой в 155кН. ТРДДФ Д-30Ф6 относится к авиационным двигателям четвертого поколения. Авиационный двигатель Д-30Ф6 состоит из десяти основных элементов:

1. Входной корпус;
2. Пяти ступенчатый КНД
3. Разделительный корпус;

4. Десяти ступенчатый КВД;
5. Камера сгорания трубчато-кольцевого типа;
6. Двух ступенчатая ТВД;
7. Двух ступенчатая ТНД;
8. Корпус наружного контура;
9. Форсажная камера сгорания со смешением потоков;
10. Сверхзвуковое регулируемое сопло.

Максимальная бесфорсажная тяга:  $2 \times 9500$  кгс; тяга на форсаже:  $2 \times 15500$  кгс; Д-30Ф6 относится к авиационным двигателям четвертого поколения. Надежность силовой установки закладывается на этапе проектирования, обеспечивается при производстве и поддерживается при техническом обслуживании [1]. От надежности силовой установки напрямую зависит результат выполнения боевой задачи и живучесть самолета. Следует отметить, что хотя надежность сложных технических систем обеспечивается тремя принципами: надежностью элементов, резервированием и регулярным техническим обслуживанием. Высокая надежность силовой установки обеспечивается не резервированием, а надежностью элементов и качественным и своевременным техническим обслуживанием. Для поддержания надежности на должном уровне выполняется техническое обслуживание с периодичностью двести, и четыреста часов налета.

В данной работе проведен анализ отказов и неисправностей реализовавшихся на силовых установках самолета МиГ-31БМ. Статистика включала шестьдесят пять событий за пять лет эксплуатации при налете двадцати бортов в количестве 11693 часов.

Повторяющиеся отказы были на реактивном сопле-16 отказов, в маслосистеме, системе запуска, топливной системе, компрессоре-4. Данная информация позволила рассчитать параметры потоков отказов этих событий. и построить структурную схему надежности. В структурную схему надежности включены изделия с наибольшим числом отказов. Изделия имеющие прямое влияние на отказ силовой установки включены в схему последовательно, а не имеющие прямого влияния (дублированные) параллельно [2-3]. Далее схема разделялась на блочную и подблочную и составлялись расчетные выражения. Выполнялся расчет безотказной работы для разных периодичностей 200 и 400 часов.

Для анализа полученных результатов построена зависимость вероятности безотказной работы от периодичности технического обслуживания [4].

1. В истребительной авиации надежность силовой установки обеспечивается только надежностью элементов, и качественным и своевременным техническим обслуживанием. Резервирование в двигателях не используется.

2. Силовая установка является важнейшим элементом самолета, без которой невозможно выполнение любой задачи.

3. Расчеты в данной работе показали, что безотказность силовой установки не опускается ниже параметра 0,9994, это свидетельствует о том что периодические формы технического обслуживания в 200 и 400 часов обеспечивают высокую надежность, необходимую для своевременного и четкого выполнения поставленных боевых задач.

#### Библиографические ссылки

1. Анцелиович Л.Л. Надежность безопасность и живучесть самолета. М. : Машиностроение, 1985. 296 с.
2. Бойко, О.Г., Фурманова Е.А. Математические основы теории систем / СибГАУ. Красноярск, 2016. 76 с.
3. Шаймарданов, Л.Г. Обеспечение надежности при контроле и оценка при эксплуатации авиационной техники [Текст] / Шаймарданов Л.Г., Лукасов В.В. Красноярск: СибГАУ, 2008 -85с.
4. Светлицкий, В. А. Статистическая механика и теория надежности [Текст] / В. А. Светлицкий. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 504 с.

#### References

1. Antseliovich, L. L. Reliability safety and survivability of aircraft. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 296 p.
2. Boyko, O. G. Furmanova, E. A. Mathematical foundations of the theory of systems / SibGAU. Krasnoyarsk, 2016. 76 p.
3. Shaimardanov, L. G. Ensuring reliability in control and evaluation in the operation of aviation equipment [Text] / Shaimardanov, L. G., Lukasov, V. V.-Krasnoyarsk: SibGAU, 2008-85с.
4. Svetlitsky, V. A. Statistical mechanics and reliability theory [ Text] / V. A. Svetlitsky. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2002. 504 p.

УДК 629.7.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ СИСТЕМЫ ТОКА 115/200В НА САМОЛЕТАХ АН-24 АН-26 АН-30

Е. А. Иконников, А. С. Ковалистов, Н. Н. Сочнев, С. И. Рослик, А. Н. Шакаль

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

*Электрическая составляющая является неотъемлемой частью самолета без которой затрудняется его эксплуатация. Рассмотрим возможную замену преобразователю тока ПО-750 для увеличения надежности и эффективности преобразования энергии.*

*Ключевые слова: ток, источник питания, преобразователь.*

## INVESTIGATION OF THE 115/200V SECONDARY CURRENT SYSTEM ON AN-24 AN-26 AN-30 AIRCRAFT

E. A. Ikonnikov, A. S. Kovalistov, N. N. Sochnev, S. I. Roslik, A. N. Shakal

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

*The electrical component is an integral part of the aircraft without which its operation is difficult. Consider a possible replacement for the PO-750 current converter to increase the reliability and efficiency of energy conversion.*

*Key words: current, power supply, converter.*

**Введение.** Электрическая составляющая самолета одна из главных его частей, и надежное резервирование источников питания является залогом надежной эксплуатации воздушного судна. Рассмотрим замену устаревшему преобразователю энергии ПО-750 на самолетах АН-24, АН-26, АН-30.

Преобразователь ПО-750 предназначен для следующих целей:

- питания самых необходимых потребителей электроэнергии переменного однофазного тока в случае отказа обоих генераторов ГО-16ПЧ8 в полете;
- питания потребителей электроэнергии, работа которых необходима во время запуска двигателей на земле;
- использования для питания потребителей электроэнергии переменного однофазного тока, суммарная мощность которых не превышает мощности преобразователя, при проверке их работоспособности на земле [1].

ПО-750 преобразует постоянный ток бортовой сети в переменный однофазный ток напряжением 115 В, частотой 400 Гц. Основными составными частями преобразователя являются электродвигатель постоянного тока и генератор переменного тока, которые собраны в общем корпусе и на общем валу. Электродвигатель питается электроэнергией постоянного тока от бортовой сети и приводит в действие генератор, который вырабатывает электроэнергию переменного тока [2].

Основные данные:

- напряжение питания 27 В;
- потребляемый ток не более 56 А;
- выходное напряжение 115 В;
- выходная мощность 750 ВА;
- отдаваемый ток 6,51 А;
- частота тока 400 Гц.

Одним из недостатков ПО-750 является преобразование электрической энергии в механическую в электродвигателе, и механической в электрическую в генераторе [3]. Преобразование электрической энергии в механическую в электродвигателе, как и в других электрических машинах связано с поте-

рями энергии, поэтому полезная мощность на выходе всегда меньше мощности на входе. Вследствие двойного преобразования энергии имеет низкий коэффициент полезного действия – 0,45-0,55. Основным недостатком однофазного преобразователя ПО-750 является наличие контактных колец и коллекторного узла усложняющих конструкцию агрегата, тем самым одновременно снижая его надежность и срок службы. Так же учитывая сложность конструкции, преобразователь ПО-750 имеет большие габариты и вес около 14кг.

Рассмотрим возможную замену устаревших и массивных электрических машин для преобразования тока на более надежные и современные статические преобразователи, такие как ПОС-1000Б на самолетах АН-24, АН-26, АН-30.

Преобразователь однофазный статический ПОС-1000Б предназначен для преобразования постоянного тока номинальным напряжением 27В, в переменный однофазный ток напряжением 115В, частотой 400Гц [4].

Постоянное напряжение питания 27В через входной фильтр радиопомех (ФРП) поступает на блок питания, который обеспечивает сервисным питанием блоки управления, и в блок конвертора, который преобразует постоянное напряжение 27В, в постоянное стабилизированное напряжение 200 В. Блок конвертора выполнен по схеме обратного преобразователя с двухобмоточным силовым дросселем. Стабилизация выходного напряжения конвертора осуществляется блоком управления конвертором изменением длительности открытого состояния силового транзистора конвертора в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки. Постоянное напряжение 200 В с выхода конвертора подается на вход инвертора, который преобразует его в стабилизированное синусоидальное переменное напряжение 115 В с частотой 400 Гц [5].

В сравнении с преобразователем ПО-750, статический преобразователь ПОС-1000Б имеет более простую конструкцию и исключает двойное преобразование энергии, что позволяет повысить коэффициент полезного действия преобразования энергии до 0,7. Более простая конструкция и отсутствие электродвигателя и генератора говорит о меньшей массе статического преобразователя – 13кг.

Предложенная нами замена необходима для повышения надежности и эффективности преобразования энергии во вторичной системе питания самолетов АН-24, АН-26, АН30.

### Библиографические ссылки

1. Е. Е. Ивушкин, М. Д. Миронов "Устройство авиационных электрических машин". Учебное пособие. ДВВАИУ, Даугавпилс, 1983 г. стр. 153...175.
2. А.П. Барвинский, Ф. Г. Козлова Электрооборудование самолётов (устройство и эксплуатация) Москва «Транспорт» 1981г. стр. 80...81.
3. Авиационное и радиоэлектронное оборудование самолета АН-24 Бондарчук И.Е., Харин В.И. «Транспорт», 1975 стр.32.
4. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: [https://www.aviationunion.ru/upload/konkurs/2013/7/Nom\\_7\\_Nagornov\\_2014.pdf](https://www.aviationunion.ru/upload/konkurs/2013/7/Nom_7_Nagornov_2014.pdf) (дата обращения 07.09.2022).
5. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://chaplin-lounge.ru/aviatsionnyu-preobrazovatel-toka-pos-1000b/> (дата обращения 07.09.2022).

### References

1. E. E. Ivushkin, M. D. Mironov ["The device of aviation electric machines"]. Study guide. DVVAIU, Daugavpils, 1983, pp. 153...175.
2. A.P. Barvinsky, F. G. Kozlova [Aircraft electrical equipment (design and operation)] Moscow "Transport" 1981. p. 80...81.
3. Bondarchuk I.E., Kharin V.I. [Aviation and radio-electronic equipment of the AN-24 aircraft] "Transport", 1975 p.32.
4. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: [https://www.aviationunion.ru/upload/konkurs/2013/7/Nom\\_7\\_Nagornov\\_2014.pdf](https://www.aviationunion.ru/upload/konkurs/2013/7/Nom_7_Nagornov_2014.pdf) (accessed 07.09.2022).
5. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://chaplin-lounge.ru/aviatsionnyu-preobrazovatel-toka-pos-1000b/> (accessed 07.09.2022).

УДК 629.7.06

## ПРОРАБОТКА СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ САМОЛЕТОВ МАЛОЙ АВИАЦИИ

А. С. Ковалистов, Н. Н. Сочнев, С. И. Рослик, А. Н. Шакаль, Р. А. Акзигитов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail:super.aks1999@gmail.com

*Безопасность полетов воздушных судов является одной из сложнейших задач. Не все самолеты малой авиации способны летать в сложных климатических условиях. На примере самолета ЛМС-901 «Байкал» рассмотрим ряд конструктивных доработок для повышения безопасности полетов.*

*Ключевые слова: безопасность полетов, воздушное судно, малая авиация, метеоусловия.*

## DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR FLIGHTS IN DIFFICULT WEATHER CONDITIONS OF LIGHT AVIATION

A. S. Kovalistov, N. N. Sochnev, S. I. Roslik, A. N. Shakal, R. A. Akzigitov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail:super.aks1999@gmail.com

*The safety of aircraft flights is one of the most difficult tasks. Small aircraft are not all capable of flying in difficult climatic conditions. Let's consider a number of design improvements to increase flight safety using the example of the LMS-901 "Baikal" aircraft.*

*Keywords: flight safety, aircraft, light aviation, weather conditions.*

**Введение.** Обеспечение безопасности полетов является наиболее актуальной проблемой на сегодняшний день, при выполнении полетов, и привыполнении технического обслуживания. Россия имеет свои географические и климатические особенности, что влияет на развитие воздушного транспорта. Прежде всего, это огромная территория, протяженностью с запада на восток в 9 часовых поясов.

На значительной ее части – суровые и экстремальные климатические условия: Сибирь Западная и Восточная, Дальний Восток, Крайний Север. Где-то она не заселена людьми либо малолюдна, в то же время на ней имеются колоссальные запасы природных ископаемых, которые могут быть освоены. Сети автомобильных и железных дорог недостаточно даже в европейской части России, и развитие этих видов транспорта во многом не рентабельно на значительной территории страны и, с экономической точки зрения, не окупится никогда. Следует отметить, что это отдаленные территории с плохо развитой инфраструктурой.

В данных условиях прекрасным вариантом становится малая авиация, но ее развитие по сравнению с западом оставляет желать лучшего. Самым востребованным самолетом местных авиалиний на данный момент, остается Ан-2 – знаменитый советский кукурузник, разработанный еще в 40-х годах прошлого столетия.

Взамен устаревшего «кукурузника» разрабатывается перспективный самолет ЛМС-901 «Байкал». Данный тип воздушного судна обладает существенными преимуществами перед другими видами самолётов, особенно в условиях крайнего севера, однако основным препятствием для такого вида авиации являются погодные аномалии, такие как: грозы, сильный ветер и обледенение.

Чтобы обеспечить безопасность полетов в данных условиях необходимо принять ряд конструктивных доработок, чтобы оснастить самолеты малой авиации механизмами и системами для полетов в тяжелых метеоусловиях.

В первую очередь нужно поработать над противообледенительной системой. Обледенение – это отложение льда в полете на различных частях воздушного судна. В большинстве случаев обледенение происходит при полете в атмосфере, содержащей переохлажденные капли воды в жидкой фазе с отрицательной температурой. При столкновении с поверхностями агрегатов самолета переохлажденные капли воды быстро кристаллизуются, образуя ледяные наросты различной формы и размеров [1].

В настоящее время для борьбы с обледенением на легких самолетах используются следующие методы:

- Пневматический;
- Жидкостно-химический;
- Электротепловой;
- Воздушно-тепловой.

Электротепловой метод является самой энергоэффективной схемой, но к недостаткам относят большой вес. Наиболее выгодным считается сочетание пневматической системы на крыле, которое представлено резиновыми бутами с электротепловой на несущем винте. Так же к ним можно добавить воздушно-тепловую систему для обогрева входного аппарата.

Горячий воздух для водного аппарата отбирается от компрессора двигателя [2]. Такую противообледенительную схему используют на самолете PilatusPC-12/47 и ATR-42/72. Так же наиболее простой и легкой является жидкостно-химическая схема противообледенительной защиты самолета. Данная схема является превентивной. Принцип работы заключается в том, что специальная жидкость на основе гликоля через специальные титановые панели с просверленным лазером отверстием подается на передние поверхности крыла и рулевые поверхности, а так же с помощью маслоотражательного кольца подается на воздушный винт [3]. Как пример, этот вид защиты используется на самолетах Cessna 208B.

Исходя из того, что основным преимуществом самолёта Ан-2 является возможность взлетать с коротких взлётно-посадочных полос, то увеличение веса самолёта негативно скажется на данном преимуществе. Следовательно, наиболее предпочтительной для будущего самолета ЛМС-901 будет система на основе противообледенительной жидкости так как, она является наиболее легкой и эффективной схемой для применения на легком самолете.

Немало важной проблемой полетов в опасных метеоусловиях может стать отсутствие точных сведений о состоянии атмосферы впереди самолета. Существует три распространенных типа метеорологических средств, используемых в кабине экипажа самолета, которые часто называют метеорологическими радарами:

- Актуальный бортовой радар для обнаружения и отображения погодной активности;
- Детекторы молний;
- Спутниковая или другая метеорологическая радиолокационная информация, загружаемая на воздушное судно из внешнего источника.

Бортовые метеорологические радиолокационные системы можно найти на самолетах всех классов. Они работают аналогично первичному радару управления воздушным движением за исключением того, что радиоволны отражаются от осадков, а не от самолетов. Плотные осадки создают более сильный возврат, чем легкие осадки. Приемник бортового метеорологического радара настроен таким образом, чтобы на дисплее в кабине экипажа тяжелые отражения отображались красным цветом, средние отражения – желтым, а легкие отражения – зеленым цветом.

Облака не создают возврата. Пурпурный цвет зарезервирован для изображения интенсивных или экстремальных осадков или турбулентности. Некоторые самолеты имеют специальный экран метеорологического радара. В большинстве современных самолетов дисплей метеорологического радара интегрирован в навигационный дисплей[4]. В настоящее время метеорологические радиолокационные системы используются в основном на крупных самолетах, так как отечественные разработки предполагают довольно большие габариты и оснащены волноводами для передачи информации от локатора. Зарубежные производители давно изготавливают компактные радиолокационные системы. Для отечественного рынка необходима разработка волноводно-щелевой антенны локатора не более

30 см в диаметре, а так же цифровой выход для передачи информации на систему индикации в самолете [5].

Предложенные нами системы необходимы для повышения безопасности полетов, при выполнении рейсов на самолетах малой авиации в опасных метеоусловиях.

#### **Библиографические ссылки**

1. Кислицина И. А. Краткий конспект «Авиационная метеорология и метеорологическая обеспечение полетов воздушных судов» /Красноярский филиал Санкт-Петербургского университета гражданской авиации. Красноярск, 2016г. / С. 35.
2. Самолет синкретическое достижение науки и техники / А.И. Данилин / МИНОБРНАУКИ РОССИИ / Самара 2011 г. / С. 116-121.
3. Aircraft deicing and anti-icing equipment / Kevin D. Murphi, Leisha Bell / Copyright 2004 AOPA Air safety foundation.
4. Бортовые информационные изделия / А.А. Кучерявый / Курс лекций / 2-е издание переработанное и дополненное / Ульяновск 2004 г. / С. 17-19.
5. Honeywell. Forward Looking Windshear Detection/Weather Radar System. User's Manual with Radar Operating Guidelines, 2004. Rev. 6.P. 19.

#### **References**

1. Kislicina I. A. [Brief synopsis "Aviation meteorology and meteorological support of aircraft flights"]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Branch of St. Petersburg University of Civil Aviation, 2016, p. 35.
2. A.I. Danilin. [Airplane syncretic achievement of science and technology]. Samara, Ministry of Education and Science of Russia, 2011, p. 116-121.
3. Aircraft deicing and anti-icing equipment / Kevin D. Murphi, Leisha Bell / Copyright 2004 AOPA Air safety foundation.
4. A.A. Kucheryavy. [On-board information products].Ulyanovsk, Course of lectures, 2nd edition revised and supplemented, 2004, p. 17-19.
5. Honeywell. Forward Looking Windshear Detection/Weather Radar System. User's Manual with Radar Operating Guidelines, 2004. Rev. 6. 19p.

© Ковалистов А. С., Сочнев Н. Н., Рослик С. И., Шакаль А. Н., Акзигитов Р. А., 2022

УДК 681.3

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЕ И ДИАГНОСТИКИ  
ВС ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ  
И ВЫЯВЛЕНИЕ ОТКАЗОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САМОЛЁТА B787**

А. Н. Коптев, С. Э. Валиев, А. А. Муминов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443031, г. Самара, Московское шоссе 34  
E-mail: eat@ssau.ru

*Статья посвящена рассмотрению вопросов оценивания состояния и диагностики систем электроснабжения ВС при эксплуатации на базе нейронных сетей.*

*Ключевые слова: образ, контроль и обслуживание СЭС, определение отказов СЭС, диагностика ВС, нейронные сети.*

**IMPROVING THE TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF THE QUALITY  
AND DIAGNOSTICS OF AIRCRAFT BY INTRODUCING NEURAL NETWORKS  
TO SOLVE THE PROBLEM OF MONITORING AND DETECTING FAILURES  
OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE AIRCRAFT B787**

A. N. Koptev, S. E. Valiev, A. A. Muminov

Samara National Research University named after academician S. P. Korolyov  
34, Moskovskoye shosse Samara, 443031, Russian Federation  
E-mail: eat@ssau.ru

*The article is devoted to the issues of assessing the condition and diagnostics of aircraft power supply systems during operation on the basis of neural networks.*

*Keywords: Index Terms – Pattern, control and maintenance of the power supply system, determination of failures of the power supply system, diagnostics of aircraft, neural networks*

**Введение:** В электросистеме ВС механизмы потенциальных отказов сложны, поэтому в качестве базового метода анализа используется дерево отказов. Частота отказов типичных компонентов, которые могут столкнуться с проблемами, показана на рис. 1.

Вероятность полной потери функции воздушного судна должна быть меньше, чем  $10^{-9}$  / час полета [1]. Отказ электроприводов напрямую приведет к потере воздушного судна, а частота отказов одного электропривода оценивается как  $3,2 \cdot 10^{-4}$  / час полета.

**Описание модели.** Для этой работы используется имитационная модель электрической системы Boeing 787, аналогичная разработанной и проверенной в [3], как показано на рис. 2. Основная шина системы электропитания имеет напряжение 230 В переменного тока / 400 Гц, а вторичные шины имеют разное напряжение (например, 270 В постоянного тока, 115 В переменного тока / 400 Гц и 28В постоянного тока), преобразованные автотрансформаторами, применяются к нескольким нагрузкам. В системе питания шины постоянного напряжения с переменной частотой основная шина должна быть подключена только к одному генератору, вторичная шина должна быть подключена только к одной основной шине одновременно [4].

**Выбранные условия систем электроснабжения.** Двенадцать условий эксплуатации, состоящих из 1 нормального (включая 2 сценария) и всего 11 неисправностей выбраны в нашей смоделированной системе и обобщены в таблице. Места неисправностей показаны на рис. 3 с красными отметками.

Неисправность генератора включает в себя межфазное короткое замыкание и обрыв цепи на одной фазе или трех фазах внутри генератора.

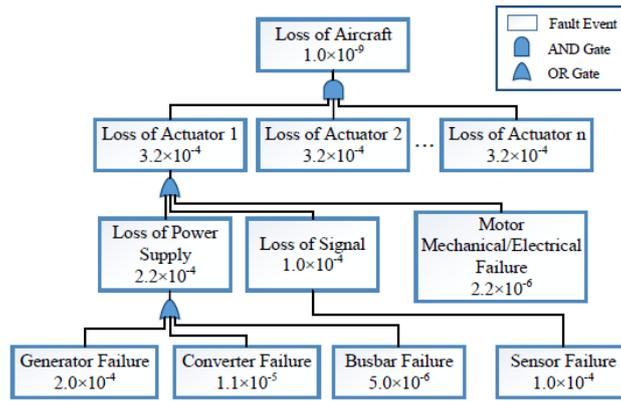


Рис. 1. Древоидная диаграмма неисправностей, построенная для системы СЭС

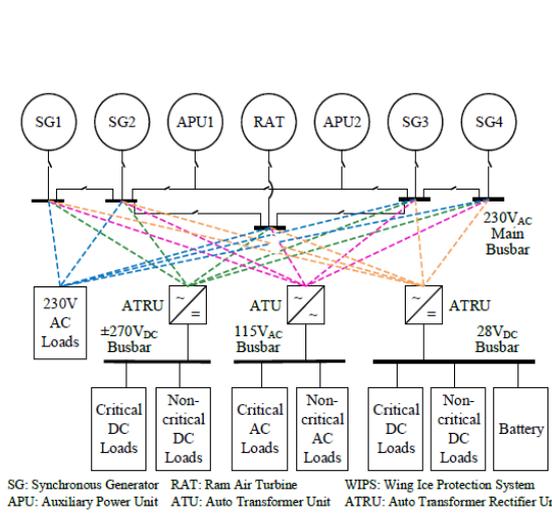


Рис. 2. Структура силовой системы Boeing 787

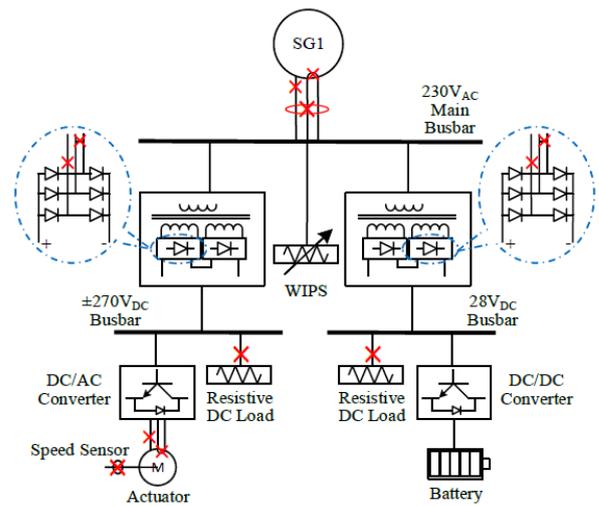


Рис. 3. Места неисправностей на модели силовой системы Boeing 787

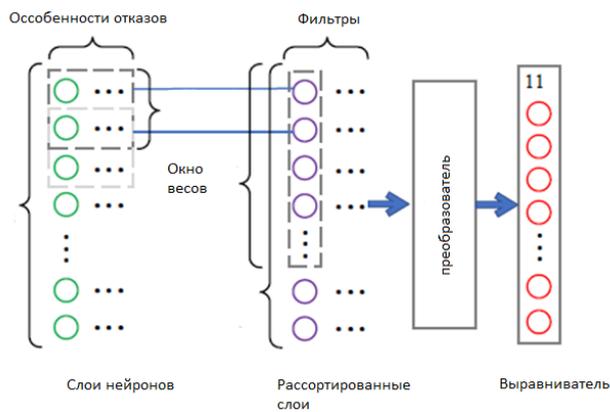


Рис. 4. Архитектура нейронной сети на основе решение нашей задачи

Неисправность преобразователя заключается в межфазном коротком замыкании или обрыве цепи на одной фазе в двух преобразователях двух ответвлений постоянного тока (т.е. 270 В постоянного тока и 28 В постоянного тока). Датчик неисправность включает в себя пропуск и смещение датчика скорости привода. Электрическая неисправность двигателя включает в себя межфазное короткое замыкание и обрыв цепи на одной фазе.

В нашем моделировании также присутствуют сбои нагрузки постоянного тока (по одному сопротивлению, нагруженному на каждую из ответвлений постоянного тока соответственно).

#### Условия, смоделированные в системе

Описания	Местоположений	Условия
Отсутствие сбоев	Изменение нагрузки WIPS в норме двигателя	Нормальное
Генератор	Межфазное короткое замыкание Разомкнутая цепь на одной фазе Разомкнутая цепь на трех фазах	Неисправность1 Неисправность2 Неисправность3
Преобразователь	Короткое/разомкнутое замыкание на линии 270В постоянного тока Короткое/разомкнутое замыкание на линии 28В постоянного тока	Неисправность4 Неисправность5
Нагрузка постоянного тока	Разомкнутая цепь нагрузки на линии 270В постоянного тока Разомкнутая цепь нагрузки на линии 28В постоянного тока	Неисправность6 Неисправность7
Двигатель	Межфазное короткое замыкание Разомкнутая цепь на одной фазе	Неисправность8 Неисправность9
Датчик скорости	Упущение Предвзятость	Неисправность10 Неисправность11

#### Библиографические ссылки

1. Дж. У. Беннетт, Г. Дж. Аткинсон, Б. К. Мекроу и Д. Дж. Аткинсон, “Отказоустойчивые конструктивные соображения и стратегии управления аэрокосмическими приводами”, IEEE Trans. Инд. Электрон., том 59, стр. 2049-2058, май 2012.
2. З. Хуанг и В. Динавахи, “Эффективный иерархический зональный метод для крупномасштабного моделирования схем и его применение в реальном времени на более электрических авиационных микросетях”, IEEE Trans. Инд. Электрон., стр. 1-1, 2018.
3. Y. Zhang, R. Su, C. Wen и др., “Распределенное распределение мощности и планирование для системы электроснабжения в более электрических самолетах”, в Proc. 42nd Annual. Конф. IEEE Ind. Электрон. Сок. (IECON), стр. 102-107, октябрь 2016 года.
5. А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. Элементы теории функций и функционального анализа. М. Наука 1981 с.543.
6. У. Гренандер. Синтез образов. М. МИР 1979 с.883.

#### References

1. J. W. Bennett, G. J. Atkinson, B. K. Mekrow, and I. J. Atkinson, “Fault-tolerant design considerations and strategies for controlling aerospace drives”, IEEE Standard Trans. Ind. Electron., volume 59, pp. 2049-2058, May 2012.
2. Z. Huang and V. Dinavahi, “Effective Hierarchical zonal method for large-scale circuit modeling and its real-time application on more electric aircraft microgrids”, IEEE Trans. Ind. Electron., pp. 1-1, 2018.
3. Yu. Zhang, R. Su, K. Wen et al., “Distributed power distribution and planning for power supply system in more electric aircraft”, 42nd Annual Issue. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), pp. 102-107, October 2016.
5. A.N. Kolmogorov, S.V. Fomin. Elements of the theory of functions and functional analysis. M. Nauka 1981 p.543.
6. U. Grenander. Synthesis of images. M. MIR 1979 p.883.

© Коптев А. Н., Валиев С. Э., Муминов А. А., 2022

УДК 681.586.326

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДАТЧИКОВ СИЛЫ И МОМЕНТА В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

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@mail.ru

*Измерение моментов и сил необходимо во многих задачах управления точным движением аэрокосмической техники. В работе представлены основные требования из руководства по использованию датчиков силы и момента и объяснения почему их стоит соблюдать.*

*Ключевые слова: датчики силы и момента.*

## OPERATION OF FORCE AND TORQUE SENSORS IN AVIATION TECHNOLOGY

O. V. Krasheninnikova

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

*The measurement of moments and forces is necessary in many tasks of controlling the precise movement of aerospace equipment. The paper presents the main requirements from the manual on the use of force and moment sensors and explains why they should be followed.*

*Key words: force and moment sensors*

В современной авиационной технике широкое использование получили разные датчики, в том числе датчики силы и момента. Для эксплуатации любого датчика существуют строгие правила, которые необходимо соблюдать.

С появлением новых датчиков появляются новые правила для их эксплуатации потому, что технологическое развитие не стоит на месте. При использовании современных датчиков силы и момента нужно сделать так, чтобы те силы, которые действуют на датчик, поступали строго в направлении измерения, если это будет возможно. Есть достаточно много причин почему нужно соблюдать выше-сказанное правило.

Например, потому, что может возникнуть систематическая ошибка измерения, то есть такое статистическое понятие, которое будет показывать, что выводы, сделанные в применении к группе, могут оказаться ложными из-за того, что отбора в эту группу был совершен неправильно из-за того, что датчик силы измеряет только силы в направлении измерения. Усилие, приложенное под каким-либо углом к направлению измерения, сильно влияет на компенсацию сил, поскольку боковые силы в большинстве случаев не являются объектом измерения – телом, которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами [1-2].

При эксплуатации датчиков так же нужно учитывать влияние поперечных усилий, изгибающих и крутящих моментов. Поперечное усилия – это такое усилие, прикладываемое к направлению измерения датчика строго перпендикулярно. Такие боковые силы могут появиться из-за собственного веса второстепенных компонентов или же из-за нагрузки, которая прикладывается под углом [3].

Так как боковое усилие не часто может действовать на высоте, где закреплен тензорезистор, поэтому поперечное усилие обязательно будет включать в себя изгибающий момент. Поперечной чувствительность датчика будет влиять на возникновение погрешности, которая в свою очередь будет вести к ошибкам. Поперечную чувствительность датчика специалисты рекомендуют определять на

базовой частоте или одной из частот, лежащей в рабочем диапазоне частот датчика, с учетом характеристик вибростенда.

Изгибающий момент – это такой момент внешних сил, который действует относительно безучастно оси сечения балки или же другого твердого тела. Если угловая погрешность будет слишком большой, это может привести к разрушению датчика силы. Фактически, изгибающий момент в большинстве случаев накладывается на фактически измеряемое усилие [4].

Вдобавок к прилагаемому усилию датчик испытывает нагрузку изгибающим моментом. Изгибающий момент вполне может возникать из-за поперечного усилия в точке приложения нагрузки. В таких условиях может появиться крутящий момент из-за веса элементов, которые прикладывают усилие в том случае, когда датчик расположен вертикально.

К созданию изгибающего момента может так же привести и приложение необычной нагрузки. В таком случае нагрузку на датчик ослабит крутящий момент с одной стороны, но так же и усиливает его с другой стороны. Разрушить датчик силы может внушительный изгибающий момент. В большинстве рассматриваемых случаев изгибающие моменты приводят к поперечному усилию – внутреннему усилию, возникающему в плоскости поперечного сечения стержня под действием нагрузки и стремящееся вызвать сдвиг одного поперечного сечения относительно другого, смежного с ним, которое создает лишнюю нагрузку на датчик силы [5].

Датчики силы, поставляемые с внутренней резьбой или резьбовыми болтами, программируются для измерения сил сжатия и растяжения. При установке датчика нужно обязательно убедиться, что резьбовые соединения были закреплены с надлежащим моментом затяжки, то есть со специально рассчитанным усилием, которое прилагается к крепежной составляющей при затягивании в резьбовое соединение.

При монтаже крутящий момент часто превышает максимальное значение, такую векторную физическую величину, которая имеет отношение к действию силы на механический объект, эта величина может привести к появлению вращательное движение. Датчик вполне может быть разрушен, если превысить максимально значения крутящегося момента и после этого без его будет невозможно восстановить. В ходе работы датчика, крутящий момент в немаловажной степени покрывается геометрией корпуса самого датчика и местом установки тензорезисторов.

Наибольший предел нагрузки обычно понимают как указание на то, что датчик при нагрузке номинальным усилием, то есть таким усилием, измеренным или рассчитанным, которое устанавливает изготовитель данного датчика, также может быть нагружен одним из паразитных воздействий – это любой случай нежелательного воздействия со стороны приборов [6].

При максимально допустимых при эксплуатации значениях воздействие сразу нескольких компонентов могут разрушить тензодатчик силы. При моментальном воздействии сразу несколько паразитных воздействий на датчик, эти элементы можно просуммировать. В общей сложности их сумма не должна быть более 100% [7].

Можно сделать вывод, что датчики эксплуатации датчиков силы и момента нужно помнить о внешних факторах, которые влияют на работу самих датчиков. Если не соблюдать простые правила эксплуатации, то датчик со временем будет показывать неверные данные, либо вообще выйдет из строя, что является нежелательным исходом. Датчики силы и момента прослужат достаточно долгий период времени, если их правильно эксплуатировать.

### Библиографические ссылки

1. В.Г. Уланов. Измерения. Обработка результатов измерений. Учебное электронное текстовое издание. В.Г. Уланов. Самара: Издательство Самарского государственного экономического университета, 2015. 52 с (дата обращения 07.07.2021).

2. Погрешность измерения [Электронный ресурс] / URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Погрешность\\_измерения#:~:text=Погрешность%20измерения%20%20отклонение%20измеренного,отклонения%20измеренного%20значения%20от%20истинного](https://ru.wikipedia.org/wiki/Погрешность_измерения#:~:text=Погрешность%20измерения%20%20отклонение%20измеренного,отклонения%20измеренного%20значения%20от%20истинного) (дата обращения 08.07.2021).

3. Поперечная сила и изгибающий момент [Электронный ресурс] / URL: [https://ukazov.ru/blog/poperechnaya-sila-i-izgibayushchiy-moment/#:~:text=Q%20-%20это%20поперечная%20\(сдвиговая%20С, в%20сечении%20\(при%20отсутствии%20кручения\)](https://ukazov.ru/blog/poperechnaya-sila-i-izgibayushchiy-moment/#:~:text=Q%20-%20это%20поперечная%20(сдвиговая%20С, в%20сечении%20(при%20отсутствии%20кручения)) (дата обращения 08.07.2022).

4. Изгибающий момент [Электронный ресурс] / URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Изгибающий\\_момент](https://ru.wikipedia.org/wiki/Изгибающий_момент) (дата обращения 08.07.2022).

5. Поперечное усилие [Электронный ресурс] / URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/railway/2476/СИЛА#:~:text=СИЛА%20ПОПЕРЕЧНАЯ.%20внутреннее%20усилие%2C%20возникающ ее,стержня%20возникают%20касательные%20напряжения%2C%20наз> (дата обращения 07.07.2022).
6. Определение момента затяжки [Электронный ресурс] / URL: <https://gskrep.ru/articles/tablitسا-usiliy-zatyazhki-pri-montazhe-metricheskogo-krepezhа/> (дата обращения 08.07.2022).
7. Номинальное усилие [Электронный ресурс] / URL: <https://www.ngpedia.ru/id544759p1.html> (дата обращения 08.07.2022).

### References

1. V.G. Ulanov. Izmereniya. Obrabotka rezul'tatov izmerenij. Uchebnoe elektronnoe tekstovoe izdanie. V.G. Ulanov. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta, 2015. 52 s (accessed 07.07.2022).
2. Pogreshnost' izmereniya Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Pogreshnost'\\_izmereniya#:~:text=Pogrėshnost'%20izmereniya%20%20otkloneniye%20izmerennogo,otkloneniya%20izmerennogo%20znacheni ya%20ot%20istinnogo](https://ru.wikipedia.org/wiki/Pogreshnost'_izmereniya#:~:text=Pogrėshnost'%20izmereniya%20%20otkloneniye%20izmerennogo,otkloneniya%20izmerennogo%20znacheni ya%20ot%20istinnogo) (accessed 08.07.2022).
3. Poperechnaya sila i izgibayushchij moment [Elektronnyj resurs] / URL: [https://ukazov.ru/blog/poperechnaya-sila-i-izgibayushchij-moment/#:~:text=Q%20-%20eto%20poperechnaya%20\(sdvigovaya%2C,v%20sechenii%20\(pri%20otsutstvii%20krucheniya\)](https://ukazov.ru/blog/poperechnaya-sila-i-izgibayushchij-moment/#:~:text=Q%20-%20eto%20poperechnaya%20(sdvigovaya%2C,v%20sechenii%20(pri%20otsutstvii%20krucheniya)) (accessed 08.07.2022).
4. Izgibayushchij moment Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Izgibayushchij\\_moment](https://ru.wikipedia.org/wiki/Izgibayushchij_moment) (accessed 08.07.2022).
5. poperechnoe usilie Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/railway/2476/SILA#:~:text=СИЛА%20ПОПЕРЕЧНАЯ.%20внутреннее%20усилие%2C%20возникayushchee,sterzhnya%20возникayut%20kasatel'nye%20napryazheniya%2C%20наз> (accessed 07.07.2022).
6. Opredelenie momenta zatyazhki Available at: <https://gskrep.ru/articles/tablitسا-usiliy-zatyazhki-pri-montazhe-metricheskogo-krepezhа/> (дата обращения 08.07.2022).
7. Nominal'noe usilie Available at: <https://www.ngpedia.ru/id544759p1.html> (accessed 08.07.2022).

© Крашенинникова О. В., 2022

УДК 656.7

## ДОРАБОТКА АВИОНИКИ G1000 В САМОЛЁТЕ CESSNA 208B ДЛЯ РАБОТ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

И. С. Кунин, Д. Г. Ананько, И. Д. Ананько

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

*В данной статье предлагается внедрение портативного СНС приемника с GLONASS на ВС Cessna 208B, для полетов в широтах выше 72° северной широты.*

*Ключевые слова: ВС, СНС, ГЛОНАСС, ГПС, орбита, широта.*

## REFINEMENT OF G1000 AVIONICS IN CESSNA 208B AIRCRAFT FOR WORK IN HIGH LATITUDES

I. S. Kunin, D. G. Ananko, I. D. Ananko

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

*This article proposes the introduction of a portable SNC receiver with GLONASS on the Cessna 208B aircraft, for flights at latitudes above 72° north latitude.*

*Keywords: AC, SNS, GLONASS, GPS, orbit, latitude.*

**Введение.** На воздушном судне (ВС) Cessna 208B установлен пилотажно-навигационный комплекс (ПНП) Garmin G – 1000.

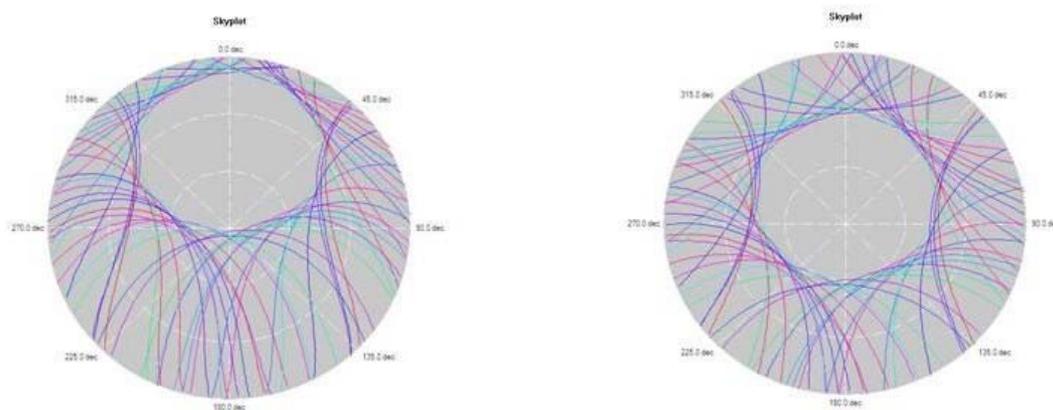
На данном приборе присутствуют запреты по эксплуатации его севернее 70° Северной широты между 85° и 114° Восточной долготы (Северная Россия) [1]. Эти запреты накладывают ограничения использования данного ВС на севере нашей страны.

Ограничения связаны с работой СНС GPS. Первый барьер, который наверняка встает перед GPS, связан с орбитальным наклоном задействованных спутников. Спутники находятся на одной из шести орбитальных плоскостей, все с наклоном около 55 градусов, хотя некоторые другие спутниковые навигационные системы, в частности Galileo и Glonass, имеют более высокие наклоны в 56 и 64,8 градусов соответственно. Северный полярный круг начинается примерно на 66,5 градусах северной широты.

На этих высоких широтах в любой момент времени всё еще видны несколько спутников, но они никогда не проходят прямо над головой. Фактически, при использовании GPS прямо на полюсе, высота самого высокого GPS спутника, который вы сможете увидеть, составляет примерно 45 градусов над горизонтом [2].

Спутники ГЛОНАСС имеют орбиту высотой 19 400 км и наклонением около 65 градусов, а потому залетают на юг и север куда дальше. О преимуществах ГЛОНАСС хорошо знают, к примеру, в Норвегии и Швеции.

Российская система на территории этих стран превосходит по точности и доступности американскую [3].



Диаграммы неба спутникового созвездия GPS для Копенгагена на  $56^{\circ}$  с.ш. (слева) и для Лонгйира на  $78^{\circ}$  с.ш. (справа). Графики сгенерированы с помощью программного обеспечения Leica Geo Office

Из выше сказанного для решения данной проблемы можно предложить несколько решений. Первое летать по правилам визуального полета (ПВП) и использовать бумажные карты региона. Второе установить портативный приемник (СНС) который будет работать с двумя системами навигации ГЛОНАСС/GPS, который даст необходимую точность для ВС на высоких широтах.

#### Библиографические ссылки

1. [https://vuzlit.com/707124/harakteristiki\\_kompleksa\\_g1000\\_ogranicheniya](https://vuzlit.com/707124/harakteristiki_kompleksa_g1000_ogranicheniya)(04.09.2022)
2. <https://radioprogram.ru/post/433>(04.09.2022)
3. <https://maxpark.com/community/5652/content/3336466>(04.09.2022)

#### References

1. [https://vuzlit.com/707124/harakteristiki\\_kompleksa\\_g1000\\_ogranicheniya](https://vuzlit.com/707124/harakteristiki_kompleksa_g1000_ogranicheniya)(04.09.2022)
2. <https://radioprogram.ru/post/433>(04.09.2022)
3. <https://maxpark.com/community/5652/content/3336466>(04.09.2022)

© Кунин И. С., Ананько Д. Г., Ананько И. Д., 2022

УДК 621.548

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ БПЛА

Г. Д. Коваленко, М. Г. Елизарьева, С. И. Меркулов

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

*Разработана модель испытательного комплекса для беспилотного летательного аппарата с цилиндрическим крыльчатом – вихревым двигателем. Представлена принципиальная схема стенда, позволяющего регистрировать физические данные в реальном времени. Приведены расчеты создаваемой двигателем подъемной силы.*

*Ключевые слова: испытательный комплекс, БПЛА, двигатель, подъемная сила*

## TEST COMPLEX OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL VORTEX PROPELLERS OF UAV

G. D. Kovalenko, M. G. Elizarieva, S. I. Merkulov

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

*A model of a test complex for an unmanned aerial vehicle with a cylindrical vane – vortex propeller has been developed. A schematic diagram of a bench is presented that allows recording physical data in real time. Calculations of the lifting force created by the propeller are given.*

*Keywords: test complex, UAV, propeller, lifting force*

Использование БПЛА в сельском хозяйстве для обработки культур позволяет исключить человека из зоны воздействия вредных химических веществ, предотвратить вытаптывание растений при обработке полей и упростить этот процесс в целом, сократив время обработки и затрачиваемые ресурсы.

Для применения цилиндрического крыльчатом – вихревого двигателя (ЦКВД) в сельском хозяйстве предполагается использование вентиляторного способа опрыскивания. Распыляемое из вала вещество в некоторой степени увеличит плотность окружающего лопатки воздуха, что в свою очередь увеличит подъемную силу, создаваемую лопаткой. Так же, для увеличения подъемной силы создаваемой ЦКВД предполагается использование эффекта Магнуса, который будет работать при движении аппарата [1].

Исследования в направлении оценки влияния эффекта Магнуса на создание подъемной силы представляют ценность для дальнейшего развития конструкций летательных аппаратов, в случае доказанной пользы эффекта Магнуса его влияние можно закладывать при разработке экономически выгодных двигателей, в том числе в области авиации [2].

Эффект Магнуса – физическое явление, возникающее при обтекании вращающегося тела потоком жидкости или газа. Образуется сила, действующая на тело и направленная перпендикулярно направлению потока. Это является результатом совместного воздействия таких физических явлений, как закон Бернулли и образования пограничного слоя в среде вокруг обтекаемого объекта [3].

Так как эффект Магнуса возникает при воздействии набегающего потока для его оценки разработан стенд карусельного типа с частотой вращения  $\omega = 1,2$  об/сек (рис. 1). Стенд состоит из двух стальных труб, соединение которых усилено фитингом, в середине проходит ось с подшипниковым узлом, соединенным двумя болтами с трубами, конструкция имеет три опоры, представляющие собой такие же стальные трубы меньшего диаметра, опора надежно фиксируется на поверхности. К концу

одной из труб уголками присоединен рельс, с катающейся кареткой. Ролики каретки выполнены из материала Д16Т. С трубой жестко соединены электронные весы, которые тросом связаны с кареткой. С кареткой своей рамой соединен циклолет.

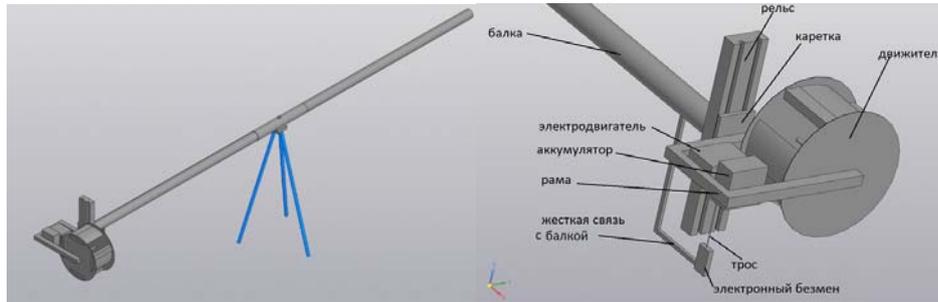


Рис. 1. Общий вид и конструкция испытательного стенда

На стенде будут получены практические значения подъемной силы, развиваемой циклолетом, рассчитана погрешность, вызванная сопротивлением воздуха, силой натяжения троса и трением роликов о рельс и оценена роль эффекта Магнуса в создании подъемной силы [4].

Расчет подъемной силы движителя с обтюратором, создающим внутренний контур (рис. 2), проводится по следующим формулам:

$$1. U_{cp} = R_{cp} \cdot \omega = 0,5 (R - R_{об}) \omega = 0,5 \omega R (1 + \varepsilon) \left( \frac{M}{c} \right); \text{ здесь } \varepsilon = R_{об} / R;$$

$$2. C = U_{cp} \cdot K = 0,5 K \omega R (1 + \varepsilon) \text{ (м/с);}$$

$$\text{Так как: } K = R (1 - \varepsilon) / \delta,$$

$$\text{то: } C = 0,5 \omega R^2 (1 - \varepsilon^2) / \delta \text{ (м/с);}$$

$$3. \Gamma_n = 2 \pi Z r C = \pi Z_m \omega R (1 - \varepsilon^2) \text{ (м}^2\text{/с) – циркуляция от лопаток;}$$

$$\text{где: } m = \frac{r}{\delta} \text{ – фаза вихря; } \omega = 2 \pi n / 60 \text{ (1/с);}$$

$Z$  – число лопаток;  $r$  – радиус вихря (м);  $n$  – число оборотов ротора в минуту.

$$4. \Gamma_б = \Gamma_d - \Gamma_{об} = 2 \pi R C_1 - 2 \pi R_{об} C_{об} = 2 \pi \omega R^2 (1 - \varepsilon^2) \text{ (м}^2\text{/с) – циркуляция от барабана;}$$

$$5. \Gamma = \Gamma_n + \Gamma_б = \pi \omega R^2 (1 - \varepsilon^2) (Z_m + 2) \text{ (м}^2\text{/с) – циркуляция от ротора;}$$

$$6. Y = \rho V l \Gamma = \pi \rho V l \omega R^2 (1 - \varepsilon^2) (Z_m + 2) \text{ – подъемная сила (Н);}$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – скорость полета, м/с;  $b$  – ширина лопатки, м;  $m =$

$$\frac{Y}{Z \pi \rho V b \omega R^2 (1 - \varepsilon^2)} - 2 / Z \text{ – для экспериментальной проверки.}$$

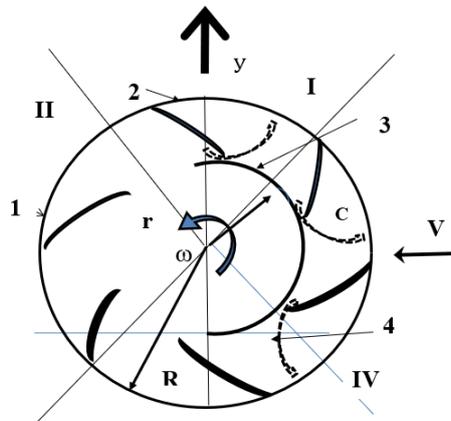


Рис. 2. Аэродинамика цилиндрического крыльчато-вихревого движителя (ЦКВД)

Расчет сил в стартовом режиме:

$$Y_{ст} = 0,5 \pi K R_{об} l U^2 (1+K)$$

$$Y_{пол} = \pi \omega^2 R^2 \rho l ((V/\omega) (1 - \varepsilon^2) (Z_m + 2) + 0,5 K R_{об} (1+K))$$

Эксперимент по измерению подъемной силы, создаваемой двигателем, предполагает последовательное изменение частоты вращения ротора и замер данных о скорости вращения и скорости потока воздуха со стороны обтюлятора и с противоположной стороны.

По полученным данным строится график и сравнивается с теоретическим, определяется наиболее выгодный режим работы [5].

### Библиографические ссылки

1. Компоновочная схема циклолета / Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. статей, том 2 / М. А. Андреев, И. А. Андреев, С. Д. Шелопугин, С.И. Меркулов. / Красноярск, 2021. с. 595-597.
2. Коваленко Г. Д., Глухова Л. Г. проектирование и технология летательных аппаратов с вихревой адаптацией гибкого крыла. СибГАУ. Красноярск, 2002. 148с.
3. Магнуса эффект // Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. М.: Большая российская энциклопедия, 2004–2017.
4. Разработка испытательного стенда цилиндрического крыльчатого вихревого двигателя / Актуальные проблемы авиации и космонавтики / С. И. Меркулов, М. Г. Елизарьева / Красноярск, 2022
5. Ящерицын, П.И. метод Планирование эксперимента в машиностроении /П.И. Ящерицын М.: Наука, 1985. 288 с.

### References

1. The layout scheme of the cyclolet / Actual problems of aviation and cosmonautics: collection of articles, volume 2 / M. A. Andreev, I. A. Andreev, S. D. Shelopugin, S.I. Merkulov. / Krasnoyarsk, 2021. pp. 595-597.
2. Kovalenko G. D., Glukhova L. G. design and technology of aircraft with vortex adaptation of a flexible wing. SibGAU. Krasnoyarsk, 2002. 148с.
3. Magnus effect // The Great Russian Encyclopedia: [in 35 t.] / chief editor Yu. S. Osipov. M.: The Great Russian Encyclopedia, 2004-2017.
4. Development of a test bench of a cylindrical winged vortex propulsion / Actual problems of aviation and cosmonautics / S. I. Merkulov, M. G. Elizarieva / Krasnoyarsk, 2022
5. Yashcheritsyn, P.I. method of experiment planning in mechanical engineering / P.I. Yashcheritsyn M.: Nauka, 1985. 288 p.

© Коваленко Г. Д., Елизарьева М. Г., Меркулов С. И., 2022

УДК 629.7.05

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ АВТОПИЛОТА ВС ATR-42

Д. М. Попов, А. С. Тимохович

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: djdimon4a@mail.ru

*В данной статье рассматриваются оптимизация процесса поиска неисправностей автопилота ВС ATR-42.*

*Ключевые слова: воздушное судно, неисправности, аэродром, автопилот, безопасность, стабилизация.*

## OPTIMIZATION OF THE ATR-42 AUTOPILOT TROUBLESHOOTING PROCESS

D. M. Popov, A. S. Timokhovich

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: djdimon4a@mail.ru

*This article discusses the optimization of the process of troubleshooting the autopilot of the ATR-42 aircraft.*

*Keywords: aircraft, malfunctions, airfield, autopilot, safety, stabilization.*

**Введение.** Актуальность данного вопроса связана с тем, что в настоящее время возрастает необходимость продолжения летной эксплуатации самолета ATR-42 на местных авиалиниях региона. С каждым годом все больше людей пользуются услугами воздушного транспорта. Вне зависимости от аварийности, роста цен на билеты и еще каких либо причин число пассажиров всё увеличивается. При этом по статистике основная доля перевозимых по миру пассажиров приходится на ближнемагистральные и среднемагистральные самолёты, летающие, как еще говорят, на местных авиалиниях. Такие самолеты еще называют региональными.

21 августа 1994 г. пассажирский самолет ATR 42-312 (регистрационный номер CN-CDT) марокканской авиакомпании Royal Air Maroc, выполнявший внутренний рейс 630 из Агадира в Касабланку, упал на землю через 10 минут после взлета. Погибли все 44 человека, находившиеся на борту. Предположительной причиной катастрофы стало отключение автопилота.

Система автопилота управляет приводами тангажа, крена и рыскания, а также приводами триммирования руля высоты. Автопилот стабилизирует самолет вокруг своего центра тяжести, удерживая угол тангажа и курс.

После включения автопилота требуется периодический контроль его работоспособности и периодическая корректировка дрейфа рулевых машин, обусловленная несовершенством схемы и параметрическим разбросом комплектующих.

Конечно же, первоочередной и самой главной проблемой при создании автопилотов является сохранение безопасности полета. В большинстве старых автоматических систем управления пилот имеет возможность в любое время произвести срочное отключение автопилота и перейти на ручное управление. При нарушении или поломке автопилота крайне необходимо отключение системы обычным способом или механическим. При разработке автопилота тщательно продумываются варианты его отключения в случае поломки без вреда для полета.

Автоматическое отключение автопилота (AP) происходит, когда:

- одно из условий подключения автопилота (AP) больше не выполняется;

- достигнут порог предупреждения о сваливании самолета;
- есть рассогласование данных между двумя системами определения курса и пространственного положения;
- существует рассогласование между двумя каналами триммирования угла тангажа.

Также система проводит постоянный анализ и мониторинг входящих информационных сигналов. Полет осуществляется на основе так называемого метода кворумирования, который состоит из принятия решения по данным большинства систем.

В случае поломки автопилот способен самостоятельно выбрать дальнейший режим управления. Это может быть переключение на другой канал управления или передача управления пилоту. Для проверки работы систем необходимо проводить так называемый предполетный прогон систем. Данный тест состоит из запуска пошаговой программы, которая подает имитацию сигналов полета.

Все же ни одна проверка не позволяет достичь 100%-й гарантии безопасности и работы в полете. Из-за нестандартных ситуаций в воздухе могут возникать дополнительные проблемы с автоматикой управления.

Чем больше новых автоматизированных систем используется, тем значительно возрастают шансы на их отказ в полете. Просчитать все варианты отказа практически невозможно.

Так на ВС АTR-42 после отключения питания происходит сброс всех отказов автопилота (AP). По этой причине невозможно отследить ошибки по порядку, а также по времени отказа каждого из компонентов. Ещё одним недостатком системы является отсутствие информации о конкретном неисправном компоненте.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод: чтобы снизить уровень аварийности самолета АTR-42 для дальнейшего продолжения летной эксплуатации на местных авиалиниях региона необходимо поместить промежуточный блок управления (запоминающее устройство), который будет считывать все отказы, запоминать их и сохранять в своей памяти, а также выводить информацию о конкретном неисправном компоненте.

#### **Библиографические ссылки**

1. <https://manualzz.com/doc/27148900/atr-42-300-aircraft-handling-manual> (Дата обращения: 06.09.22)
2. <https://forum.airlines-inform.ru/atr-42/> (Дата обращения: 06.09.22)
3. <http://avia-simply.ru/atr-42-atr-72/> (Дата обращения: 06.09.22)
4. <https://infopedia.su/9x6bec.html> (Дата обращения: 06.09.22)
5. <https://www.avsim.su/f/dokumentaciya-obshego-znacheniya-16/rukovodstvo-po-izucheniyu-sistem-atr-42-500-66548.html?action=comments> (Дата обращения: 06.09.22)

© Попов Д. М., Тимохович А. С., 2022

УДК 629.7. 054.07

## РАЗВИТИЕ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Н. Н. Сочнев, Е. А. Иконников, С. И. Рослик, А. Н. Шакаль, А. С. Ковалистов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: opexu2020@gmail.com

*В статье рассматривается проблема импортозамещения в авиационной промышленности на примере высотомера AD32. Выявлены его основные преимущества и предложены несколько решений по модификации отечественного оборудования.*

*Ключевые слова: импортозамещение, воздушное судно, высотомер, оборудование.*

## DEVELOPMENT OF IMPORT SUBSTITUTION IN THE FIELD OF CIVIL AVIATION

N. N. Sochnev, E. A. Ikonnikov, S. I. Roslik, A. N. Shakal, A. S. Kovalistov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: opexu2020@gmail.com

*The article deals with the problem of import substitution in the aviation industry by the example of the AD 32 altimeter. Its main advantages are revealed and several solutions for the modification of domestic equipment are proposed.*

*Keywords: import substitution, aircraft, altimeter, equipment.*

**Введение.** Развитие импортозамещения в области гражданской авиации, которое способствует стимулированию национального промышленного производства в условиях нынешней политической обстановки и, как следствие, иностранных санкций, способно обеспечить устойчивость авиационных предприятий страны, а также её регионов. При этом, принимаемые сегодня, меры по стимулированию импортозамещения не позволяют в полной мере раскрыть потенциал его стимулирующей составляющей.

Целью исследования является разработка мер по росту импортозамещения как метода импортозамещения в области снабжения воздушных судов минимальным необходимым оборудованием. В ходе исследования использовались системный подход и статистический анализ. В качестве примера было использовано пилотажно-навигационное оборудование самолёта АН-24/26 и проанализирована современная ситуация в области импортозамещения. Авторы пришли к выводу о необходимости оптимального сочетания по большей части отечественного оборудования. При таком подходе в совокупности будет возможно заменить импортное оборудование. Это позволит устранить ряд недостатков, связанных с проблемой ограниченного объема импортного оборудования в стране и дороговизны его ремонта и транспортировки [1].

После череды авиационных инцидентов, связанных со столкновениями ВС в управляемом полете с поверхностью Земли и/или искусственными препятствиями на ней в 2015 году министерством транспорта Российской Федерации было опубликовано письмо об обязательном размещении на борту воздушных судов системы предупреждения (сигнализации) об угрозе столкновения [2]. В связи с этим авиационные компании стали массово внедрять в парк эксплуатируемых воздушных судов систему СРПБЗ (Система раннего предупреждения близости земли).

Системой СРПБЗ считываются данные о высоте полета самолета с высотомеров и поэтому был найден доступный и массовый прибор, который мог бы делиться информацией по высоте с данной системой. Таким прибором на то время стал аналоговый барометрический высотомер производства

Швейцарии AD-32 с датчиком температуры воздуха за бортом OAT (Outside Air Temperature). Сегодня этот высотомер установлен на многих самолетах и вертолетах отечественного производства, таких как АН-24/26, Ми-8Т/МТВ и др.

Высотомер AD32 сочетает в себе компьютер с цифровым высотомером. Это делает AD32 идеально подходящим для замены резервных высотомеров в самолетах с неподвижным крылом и винтокрылых летательных аппаратах при минимизации усилий по установке. Также AD32 измеряет динамическое и статическое давление с помощью датчиков Vibrating Cylinder Technology (VCT). Скорректированная высота отображается на ЖК-дисплее как в цифровом, так и в аналоговом формате. Благодаря быстро реагирующему указателю, управляемому шаговым двигателем, AD32 позволяет в режиме реального времени указывать высоту во время быстрых вертикальных маневров [3].

На сегодняшний день установка прибора AD32 на самолеты является необходимой, но практика показала, что приборы такого рода зачастую выходят из строя. Ремонт данного оборудования до недавнего времени производился за границей – при выходе его из строя оно немедленно отсылалось к изготовителю для ремонта и обратно. Но в нынешних политических и экономических условиях страны возникает множество проблем, связанных с поставкой зарубежного оборудования, а также его ремонтом, в том числе и AD32. Поэтому возникает острая необходимость замены такого типа оборудования отечественными аналогами.

Помимо AD32 некоторые самолеты оборудованы электромеханическим высотомером ВЭМ-72, который предназначен:

а) для измерения относительной барометрической высоты полета и выдачи её для визуального наблюдения экипажем –  $H_{отн}$ ;

б) для измерения абсолютной барометрической высоты полёта и выдачи её в виде относительных сопротивлений потенциометрического выхода –  $H_{абс}$ ;

в) для выдачи информации в виде замыкания контактов счетчика-сигнализатора  $P_0$  об установке на нем значения давления  $P_0$  равного 760 мм рт. ст.

Высотомер ВЭМ-72 устанавливается на самолетах с высотой полета, не превышающей 15000 м.[4].

Как следствие оба прибора выполняют практически одни и те же функции и одним из наиболее существенных отличий является то, что AD32 работает в сочетании с системой раннего предупреждения близости земли TAWS (Terrain Awareness and Warning System) и с системой предупреждения столкновений самолетов в воздухе TCAS (Traffic Collision Avoidance System).

Для решения данной проблемы предлагается на базе имеющегося высотомера ВЭМ-72 создать модифицированный прибор, который в совокупности с дополнительным оборудованием, таким как СВС – система воздушных сигналов, будет полностью заменять AD32. Система воздушных сигналов установлена на некоторых самолетах как самостоятельный прибор и в свою очередь уже является практически полным аналогом AD32.

Другим решением данной проблемы является усовершенствование ВЭМ-72, путем добавления к нему компьютеризированного устройства для связи высотомера с системами TCAS и TAWS. Такой бортовой комплекс, объединяющий в себе все системы, обеспечивающие безопасность полета, сможет немедленно предупреждать экипаж о любой надвигающейся опасности. Что во много раз сократит авиационные происшествия.

Реализация перечисленных решений импортозамещения – необходимый и трудоемкий процесс, который позволит обеспечить удовлетворение потребностей внутреннего рынка в авиапромышленности отечественного производства.

Потребность данных мероприятий в ближайшей перспективе будет только увеличиваться, что подтолкнет отечественных производителей авиационного оборудования к усовершенствованию уже имеющегося оборудования и созданию нового [5].

### Библиографические ссылки

1. О Правительственной комиссии по импортозамещению: Постановление Правительства РФ от 4 августа 2015 г. №785 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/642506> (дата обращения: 11.09.2022).

2. О направлении Методических рекомендаций для эксплуатантов по подготовке экипажей ВС к полетам с использованием бортовой многофункциональной системы СРПБЗ (GPWS): Письмо Роса-

виации от 10.02.2015 №01.01-206 [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/z8aaa> (дата обращения: 11.09.2022).

3. J. Garrett. AD32 Air data display installation and operation manual. 2019. P. 25-26.

4. Электромеханический высотомер ВЭМ-72: Руководство по технической эксплуатации 1981. С. 7.

5. Стратегия развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.: Проект Министерства промышленности и торговли. [Электронный ресурс] URL: <https://www.aex.ru/m/docs/2/2017/10/13/2666/> (дата обращения: 11.09.2022).

### References

1. O Pravitel'svennoy komissii po importozamesheniu: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 4 avgusta 2015 №785 [On the Government Commission on Import Substitution: Decree of the Government of the Russian Federation] Available at: <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/642506> (accessed 11.09.2022).

2. O napravlenii metodicheskikh rekomendatsiy dlya ekspluatantov po podgotovke ekipazhey VS k polyetam s ispol'zovaniem bortovoy mnogofunktsional'noy sistemy SRPBZ: Pis'mo Rosaviatsii ot 10.02.2015 №01.01-20 [On the direction of Methodological recommendations for operators on the preparation of aircraft crews for flights using the onboard multifunctional GPWS system: Letter from the Federal Air Transport Agency dated 10.02.2015] Available at: <https://clck.ru/z8aaa> (accessed 11.09.2022).

3. J. Garrett. AD32 Air data display installation and operation manual. 2019. P. 25-26.

4. Elektromekhanicheskiy visotomer VEM-72: Rukovodstvo po tekhnicheskoy ekspluatatsii 1981. S. 7 [Electromechanical altimeter VEM-72: Technical operation Manual] 1981. P.7.

5. Strategiya razvitiya aviatcionnoy promyshlinnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2030. Proekt ministerstva promyshlinnosti i tirgovli. [Strategy for the development of the aviation industry of the Russian Federation for the period up to 2030: Project of the Ministry of Industry and Trade]. Available at: <https://www.aex.ru/m/docs/2/2017/10/13/2666/> (accessed 11.09.2022).

© Сочнев Н. Н., Иконников Е. А., Рослик С. И.,  
Шакаль А. Н., Ковалистов А. С., 2022

УДК 629.735.017.1

## **К ВОПРОСУ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ВНЕШНЕЙ ЛИНЕЙНОЙ СТАНЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

С. В. Федоров, А. В. Солодкин, Ю. В. Чурбаков, Д. А. Плотников, 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: lenusyat@mail.ru

*Практика технического обслуживания и ремонта гражданских воздушных судов, доказывает, что расширение сети станций технического обслуживания существенно влияет на успех в конкурентной борьбе на рынке перевозок гражданской авиации.*

*Ключевые слова: гражданская авиация, техническое обслуживание и ремонт, экспорт, услуги по обеспечению летной годности самолетов*

## **TO THE QUESTION OF THE ORGANIZATION OF THE EXTERNAL LINE STATION OF AIRCRAFT MAINTENANCE**

S. V. Fedorov, A. V. Solodkin, U. V. Churbakov, D. A. Plotnikov, O. G. Boyko

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

*The practice of maintenance and repair of civil aircraft proves that the expansion of the network of service stations significantly affects the success in the competitive struggle in the civil aviation transportation market.*

*Keywords: civil aircraft, maintenance and repair, export, aircraft airworthiness services*

Многочисленные участники рынка отмечают, что рынок технического обслуживания (ТО) воздушных судов в Российской Федерации очень конкурентен, особенно в сегментах линейного и базового технического обслуживания воздушных судов, и эта конкуренция в краткосрочной перспективе будет только усиливаться. Развитие рынка ТО и ремонта самолетов и их компонентов в России в ближайшем будущем будет определять совершенствование планирования ТО, увеличение доли аутсорсинга – использование внешнего источника/ресурса ТО, внедрение эффективных ИТ-решений, увеличение количества доступных деталей и узлов за счет складских запасов авиационных запчастей. Сегодня около 98% всех перевозок в РФ приходится на самолеты иностранного производства. Естественно, сильно изменился и рынок технического обслуживания самолетов.

Если портом приписки является иностранный аэропорт, то в этом порту должна быть создана внешняя линейная станция технического обслуживания и ремонта воздушных судов с получением соответствующего свидетельства департамента воздушного транспорта (ДВТ) [1].

Работы по ТО и ремонту воздушных судов (ВС) Авиакомпаний в базовом иностранном аэропорту могут быть переданы по договору другой Организации по техническому обслуживанию и ремонту. При этом в структуре инженерно авиационной службы (ИАС) Авиакомпаний в этом зарубежном аэропорту должно быть подразделение, осуществляющее контроль за своевременностью и качеством выполнения технического обслуживания по договорам на техническое обслуживание и поддержание летной годности воздушных судов. При базировании за границей порядок обслуживания, расшифровки и анализа средств объективного контроля (СОК) с учетом места, объема и характера работ должен быть подробно отражен в составляемых и согласовываемых с ДВТ договорах (контрактах).

Техническое обслуживание воздушных судов в зарубежных аэропортах осуществляется инженерно-техническим персоналом представительства Авиакомпании, прошедшими соответствующую подготовку и имеющими допуск к самостоятельному техническому обслуживанию воздушных судов данного типа.

Техническое обслуживание ВС Авиакомпании в транзитных и промежуточных иностранных аэропортах может осуществляться сторонней организацией по техническому обслуживанию и ремонту по договору между Авиакомпанией и данной Организацией. При этом, если это внешняя линейная станция другой российской авиакомпании, то она должна иметь сертификат ДВТ на право выполнения работ по техническому обслуживанию самолетов данного типа, а если это иностранная организация по техническому обслуживанию и ремонту, то он должен иметь сертификат (разрешение, одобрение) от авиационных властей своего государства и допуск ДВТ.

При невозможности обеспечения ТО ВС эксплуатанта (Авиакомпании) в аэропорту иностранного государства специалистами, имеющими допуск к требуемому виду ТО, техническое обслуживание ВС осуществляется персоналом технической службы эксплуатанта (Авиакомпании), который включается в состав экипажа поименно в соответствии с техническим заданием на выполнение работ с записью на фронте задания на полет и отметкой «Обслуживание инженерно-технического персонала».

За профессиональную подготовку инженерно-технического состава, входящего в состав экипажа, и оформление допуска инженерно-технического состава к обслуживанию воздушных судов в иностранных аэропортах несет ответственность руководитель авиационной службы эксплуатанта (Авиакомпании). Список инженерно-технического персонала, участвующего в полетах, должен быть составлен приказом руководителя Авиакомпании.

Лица инженерно-технического персонала, участвующие в полетах, должны быть застрахованы как члены экипажа воздушного судна.

Авиакомпания должна разработать с отражением в руководствах Авиакомпании по производству полетов и техническому обслуживанию воздушных судов порядок взаимодействия специалистов летной и инженерно-технической служб при включении инженерно-технического персонала в состав экипажа.

При необходимости в иностранном аэропорту должна быть организована работа по:

- заправке систем самолета маслами, рабочими жидкостями для гидросистем или смазками в соответствии с требованиями нормативных документов;
- введению противоводокристаллизационной жидкости в топливо в количестве, установленном руководством по летной эксплуатации для данного типа ВС.

В ряде стран существует требование гармонизации национальных сертификационных требований в странах региона, не входящих в ЕС, со стандартами EASA и их последующего признания им.

Еще одним вызовом и основной угрозой для компаний, занимающихся обслуживанием гражданских самолетов, являются изменения в технологиях и усложнение авиационной техники, что меняет всю философию ее обслуживания. Так, если сейчас до 80% компонентов самолетов второго и третьего поколения могут обслуживать ремонтные компании, работающие независимо от производителя самолета, то для самолетов пятого поколения эта пропорция может быть обратной. Прогнозируется, что ремонт до 80% комплектующих так или иначе будет осуществляться под непосредственным контролем авиастроителя или просто на его мощностях [2].

Стремление повысить рентабельность операций при низких или сниженных затратах способствовало появлению еще одной новой тенденции: поставщики услуг по обеспечению летной годности воздушных судов стали закупать на рынке запасные части, снятые со списанных самолетов. Такие детали должны быть полностью протестированы в специальных сертифицированных ремонтных мастерских перед дальнейшим использованием. Для самолетов третьего и четвертого поколений именно эти запчасти в настоящее время используются более широко, чем новые.

Рост спроса на новые самолеты является инструментом поддержки экономического развития. Предполагается, что Азиатско-Тихоокеанский регион займет лидирующие позиции по мировому спросу в ближайшие 15-20 лет, опередив Европу и Северную Америку. Китай, в частности, может в конечном итоге обогнать Соединенные Штаты как крупнейший внутренний авиационный рынок. Подсчитано, что в течение следующих 20 лет только китайским авиакомпаниям потребуется около 4500 самолетов.

Какие производители самолетов выиграют от этого увеличения заказов? Скорее всего, лидерами являются Airbus и Boeing. Но их позиции под угрозой. На рынок выходят конкуренты, прежде всего, это канадская компания Bombardier, китайская Comac, бразильская Embraer, российская «Иркут», японская Mitsubishi и некоторые другие. Конечно, надо признать, что путь к рынку непрост и довольно долг. Известные специалистам задержки с выполнением программ запуска новых самолетов C919 (Comac) и CSeries (Bombardier) доказывают это. Путь к освоению всех этапов производства самолетов неблизок, но широкое использование договорных отношений, использование услуг аутсорсинга, применение зарубежных технологий в производстве деталей из композитов, стремление к достижению наивысшего уровня качества для каждой компонент устройств являются инструментами для достижения успеха на рынке.

В то же время надо признать, что «последним оплотом» Airbus и Boeing является рынок дальнемагистральных самолетов, то есть тех, которые преодолевают самые большие расстояния. На данный момент модели Comac, Bombardier и Irkut атакуют рынок авиации на средние расстояния, конкурируя с Airbus A320 neo и Boeing B737 MAX. Но каждый конкурент ищет новые средства борьбы за рынок, и ясно одно: в будущем борьба между компаниями будет усиливаться на всех рынках.

### **Библиографические ссылки**

1. Авиационный евроремонт: Тренды техобслуживания самолетов в Восточной Европе // [https://cfts.org.ua/articles/aviatsionnyy\\_evroremont\\_trendy\\_tekhobsluzhivaniya\\_samoletov\\_v\\_vostochnoy\\_evrope\\_1079/82978](https://cfts.org.ua/articles/aviatsionnyy_evroremont_trendy_tekhobsluzhivaniya_samoletov_v_vostochnoy_evrope_1079/82978)
2. James Olivier Le marché des avions grossit, le duopole Airbus-Boeing s'effrite... // <https://www.usinenouvelle.com/article/le-marche-des-avions-grossit-le-duopole-airbus-boeing-s-effrite.N205726>

© Федоров С. В., Солодкин А. В., Чурбаков Ю. В., Плотников Д. А., Бойко О. Г., 2022

УДК 681.586.326

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДАТЧИКОВ ВРЕМЕНИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

А. С. Цапиенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: NastyaTsap05@gmail.com

*Отслеживание заданного заранее времени и временного интервала необходимо во многих задачах управления аэрокосмических устройств. В работе представлены основные области и цели применения датчиков времени, устройство и принцип их работы.*

*Ключевые слова: датчики времени, аэрокосмические устройства.*

## OPERATION OF AEROSPACE TIME SENSORS

A. S. Tsapienko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: NastyaTsap05@gmail.com

*Tracking a predetermined time and time interval is necessary in many control tasks of aerospace devices. The paper presents the main areas and purposes of using time sensors, the structure and principle of their operation.*

*Keywords: time sensors, aerospace devices.*

Для работы схем управления электропривода, в том числе и разомкнутого, необходима информация о текущих значениях его скорости, тока, момента, ЭДС и других координат, а также времени. Устройства, которые выдают подобную информацию в виде электрических сигналов, получили название измерительных преобразователей или датчиков [1].

Датчик – это элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства, преобразующий контролируемую величину (температуру, давление, частоту, силу света, электрическое напряжение, ток и т. д.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы. Или проще, датчик – это устройство, преобразующее входное воздействие любой физической величины в сигнал, удобный для дальнейшего использования.

На сегодняшний день существует огромное количество всевозможных датчиков и коммутирующих устройств. Они служат для соединения или разъединения электронных цепей, при этом управление коммутатором происходит малыми токами [2].

Датчики времени считаются одними из наиболее простых и в то же время необходимых устройств автоматики. Предназначено это устройство для выполнения задачи отслеживания заданного заранее времени и временного интервала. Датчик используется в случаях, когда нужно автоматически выполнить какое-либо действие, но не сразу после появления сигнала, а через небольшой промежуток времени. Датчики выполняются на выдержки времени от 10 до 900 с с числом управляемых цепей до 16 для работы как при переменном, так и при постоянном токе [3].

Схема датчика времени с часовым механизмом представлена на рисунке.

Процесс программирования датчиков времени заключается в установке режима работы, диапазона и необходимого интервала времени. При автоматизации технологических процессов также может возникнуть необходимость производить операции в определенной временной последовательности.

По способу программирования датчики времени делятся на два вида: с аналоговым и цифровым программированием. При этом каждый из видов имеет свои преимущества и предназначается для более эффективного использования их функций. К примеру, аналоговые датчики времени достаточно легко программируются, перенастраиваются, они гораздо проще в эксплуатации и несколько дешевле по стоимости. Датчики цифровые позволяют задать наиболее точный временной интервал и исключают возможность появления программной ошибки. С помощью органов контроля датчики времени легко программируются. Они монтируются на DIN-рейку или на лицевую панель. Способ подключения: через специальную колодку, разъем, клеммы. Для задания времени используются переключатели, потенциометры и кнопки.

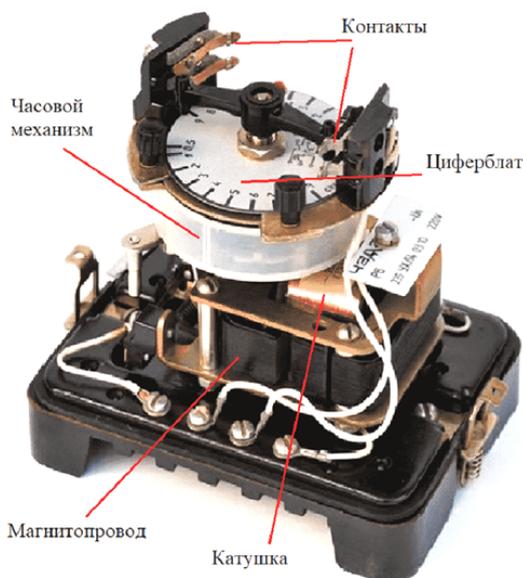


Схема датчика времени с часовым механизмом

Некоторые модели датчиков времени для осуществления бесперебойной работы в особенно критические моменты оснащают встроенными аккумуляторами, которые можно подзаряжать от сетевого питания или использоваться импульсный блок питания. На протяжении длительного времени запрограммированное устройство сохраняет заданные параметры, потому что оно имеет энергонезависимую память.

Каждые датчики времени оборудованы на передней панели информационным табло, где представляются в наглядном виде все данные, необходимые для анализа. Датчики времени не требуют постоянного высококвалифицированного обслуживания, они достаточно надежны, просты в эксплуатации, прекрасно защищены от помех, влаги и пыли [4].

Недостатками датчиков являются сложность конструкции и малая износостойкость. Достоинства – большие выдержки времени и высокая точность последовательности переключения контактов, что не достигается другими способами.

Датчики используются во многих устройствах, окружающих современного человека. Зачастую, в жизни, требуется автоматизация циклов запуска и остановки различного оборудования.

Многофункциональные программные датчики времени имеет достаточно обширную область применения. В наше время датчики времени широко используются в современных устройствах. Простая схема подключения позволяет применять его для управления освещением в домах, для создания искусственного света, в частности на птицефабриках, для оснащения насосов, которые применяются для подачи воды, в осветительных и рекламных щитах, в аэрокосмических устройствах, в холодильном, воздушном, и испытательном оборудовании и т.п. Кроме того, датчики времени устанавливаются на оросительных системах и термопечах.

Основная цель, которая преследуется при оборудовании систем подобного рода датчиков времени – это возможность экономии энергоресурсов, снижение нагрузки на себестоимость продукции [5].

### Библиографические ссылки

1. Датчики времени [Электронный ресурс] / URL: [https://mobile.studbooks.net/621386/matematika\\_himiya\\_fizika/datchiki\\_vremeni](https://mobile.studbooks.net/621386/matematika_himiya_fizika/datchiki_vremeni) (дата обращения 13.07.2022 г.).
2. Сувернев, Д. В. Устройство и принцип работы датчиков времени / Д. В. Сувернев. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2020. № 12 (302). С. 54-55. URL: <https://moluch.ru/archive/302/68261/> (дата обращения: 13.07.2022).
3. Принцип действия датчиков времени [Электронный ресурс] / URL: [https://stud.wiki/physics/2c0a65635a3bc68b4d53b89521306c27\\_0.html](https://stud.wiki/physics/2c0a65635a3bc68b4d53b89521306c27_0.html) (дата обращения 13.07.2022 г.).
4. Цель применения датчиков времени [Электронный ресурс] / URL: <https://elec-ru.turbopages.org/elec.ru/s/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1905/> (дата обращения 13.07.2022 г.).
5. Изучение устройства [Электронный ресурс] / URL: <https://ronl.org/stati/fizika/210691/> (дата обращения 13.07.2022 г.).

### References

1. Time sensors [Electronic resource] / URL: [https://mobile.studbooks.net/621386/matematika\\_himiya\\_fizika/datchiki\\_vremeni](https://mobile.studbooks.net/621386/matematika_himiya_fizika/datchiki_vremeni) (Accessed 07/13/2022).
2. Suvernev, D. V. Device and principle of operation of time sensors / D. V. Suvernev. Text: direct // Young scientist. 2020. No. 12 (302). S. 54-55. URL: <https://moluch.ru/archive/302/68261/> (date of access: 07/13/2022).
3. The principle of operation of time sensors [Electronic resource] / URL: [https://stud.wiki/physics/2c0a65635a3bc68b4d53b89521306c27\\_0.html](https://stud.wiki/physics/2c0a65635a3bc68b4d53b89521306c27_0.html) (Accessed 07/13/2022).
4. The purpose of using time sensors [Electronic resource] / URL: <https://elec-ru.turbopages.org/elec.ru/s/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1905/> (accessed 13.07.2022).
5. Studying the device [Electronic resource] / URL: <https://ronl.org/stati/fizika/210691/> (accessed 07/13/2022).

© Цапиенко А. С., 2022

УДК 62-4

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В АВИАСТРОЕНИИ

М. З. Эргашева\*, 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: madinochka2505@mail.ru

*Материал является подготовительным этапом в исследовании коррозионной стойкости электрохимических покрытий металлов и сплавов, применяемых в авиационной промышленности.*

*Ключевые слова: сталь, титан, алюминий, сплав, применение, производство, термостойкость, коррозионная стойкость, электрохимические покрытия.*

## INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE USE OF METALS IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

M. Z. Ergasheva\*, M. V. Chizhevskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: madinochka2505@mail.ru

*The material is a preparatory stage in the study of corrosion resistance of electrochemical coatings of metals and alloys used in the aircraft industry.*

*Keywords: steel, titanium, aluminum, alloy, application, production, thermal stability, corrosion resistance, electrochemical coatings.*

Для строительства самолетов требуются прочные и легкие материалы, а также материалы, способные выдерживать сильное давление на больших высотах и климатические условия. Металлы, используемые в авиационной промышленности, включают сталь, алюминий и титан.

Выбор материалов и сплавов, применяемых в авиационной промышленности подчинен ряду жестких критериев, определяющих в первую очередь безопасность полетов, экономичность производства и обслуживания, коррозионную стойкость конструкций.

Системы покрытий, необходимые для защиты от коррозии открытых поверхностей самолета, должны быть тщательно подобраны, чтобы соответствовать вызовам агрессивной среды, в которой эксплуатируется самолет. Покрытие должно наноситься с большой осторожностью, чтобы обеспечить долговечность самолета.

Европейскими производителями используются алюминиевые, никелевые сплавы, сталь и титан. Авиастроители предпочитают использовать высокопрочные алюминиевые сплавы (в первую очередь сплав 7075) для усиления алюминиевых конструкций самолетов. Сплав 7075 содержит медь, магний и цинк, добавленные для дополнительной прочности. Алюминий обычно составляет около 80 процентов веса самолета (без груза), и поскольку он обладает высокой устойчивостью к коррозии за счет образования прочных оксидных пленок, его можно оставить неокрашенным. Однако при высоких температурах алюминий может потерять прочность, его не используют на поверхности обшивки самолета.

Около 11-13 % материалов, используемых в самолете, составляет сталь, которая в три раза прочнее алюминия, при этом она и тяжелее. Прочность, твердость и термостойкость делают её идеальным материалом для использования на поверхности обшивки самолета и шасси, часто используют для изготовления петель, тросов и крепежных элементов, где её прочность является ключевой.

Несмотря на дороговизну, титан широко используется в авиастроении благодаря своему качеству, включающему высокую прочность, термостойкость и коррозионную стойкость. Титан обычно используется в различных деталях самолета как снаружи, так и в двигателе. По мере того как титан получает все более широкое применение, ожидается, что его стоимость снизится, что сделает его предпочтительным металлом в аэрокосмической промышленности. В настоящее время затраты, связанные с титаном, означают, что его невозможно использовать для широкого применения во всех самолетах.

Никелевые сплавы популярны в аэрокосмической технике из-за их способности противостоять высоким температурам и коррозии. Они структурно прочные и обладают свойствами сопротивления ползучести. Никелевые сплавы часто используются для изготовления турбин авиационных двигателей из-за огромного нагрева, которому подвергается эта часть двигателя. Поскольку никелевые сплавы сохраняют свою прочность при повышенных температурах, они идеально подходят для этой функции.

После изготовления каркаса и компонентов самолета их по существу защищают путем нанесения слоев коррозионностойких сплавов, керамики и красок.

Российскими производителями самолетов применяются высокопрочные алюминиевые сплавы и сплавы средней и повышенной прочности.

Широкое применение алюминия в российской авиационной промышленности обусловлено с его большими запасами, а также совокупностью химических, технических, механических и физических свойств. Сплав 1420 используют при конструировании сварного фюзеляжа пассажирского самолета. К его достоинству можно отнести его малую плотность, высокую прочность, хорошую тепло- и энергопроводность, устойчивость к коррозии. Стоит отметить, что сплав алюминия 1420 является наиболее перспективным для изготовления баковых конструкций, так как является устойчивым к различным видам ГСМ (топлива).

Выбор подходящего покрытия, исходя из условий эксплуатации воздушного судна важен для обеспечения экономичного срока службы воздушного судна [1-3].

Одним из способов защиты таких сплавов является метод плазмохимического оксидирования (ПХО), позволяющий получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальными свойствами.

ПХО-покрытия могут применяться для создания на деталях прочного тепло- и электроизолирующего слоя, защиты поверхностей от эрозии в высокоскоростных газовых потоках, коррозии в агрессивных средах, износа трением, для повышения коэффициента излучения поверхности и т. п. Изучение коррозионной стойкости титановых сплавов с ПХО-покрытием в различных агрессивных средах является актуальной задачей, решение которой поможет расширить области применения данных сплавов в различных отраслях промышленности, повысить срок эксплуатации деталей и узлов, работающих в жестких эксплуатационных условиях [4-5].

### Библиографические ссылки

1. Структура и свойства листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 / Ю. Ю. Клочкова, Г. Г. Клочков, В. А. Романенко и др. // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4. С. 7-12.
2. Моисеев В. Н. Высокопрочные титановые сплавы для крупногабаритных деталей авиационного двигателя // МиТОМ. 2000. №2. С. 34-36
3. Неупокоева, А. А., Иванченко А. О. Опыт использования титановых сплавов в авиастроении // Новые технологии нефтегазовому региону: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 2010. С. 56-57.
4. Mironova V.A., Chizhevskaya M.V., Girn A.V., Ravodina D.V., Mikheev A.E. and Khodenkova E.V. Corrosion chemical mechanism in aggressive liquid of MAO coatings based on OT-4 titanium alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 919 (2020) 022058 IOP Publishing. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/919/2/022058> (дата обращения: 10.09.2022).
5. Chizhevskaya M.V., Mironova V.A., Girn A.V. and Khodenkova E.V. Chemical Processes in PEO Coatings Formation and Destruction on Titanium Alloy VT-1. URL: <https://www.scientific.net/KEM.887.332> (дата обращения: 10.09.2022).

### References

1. Struktura i svoystva listov iz vysokoprochnogo alyuminiy-litievogo splava V-1469 [The structure and properties of sheets of high-strength aluminum-lithium alloy V-1469] / Yu. Yu. Klochkova, G. G. Klochkov, V. A. Romanenko i dr. // *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2015. №4. S. 7-12 (In Russ.).
2. Moiseev V. N. Vysokoprochnye titanovye splavy dlya krupnogabaritnykh detaley aviatsionnogo dvigatelya [High-strength titanium alloys for large aircraft engine parts] // *MiTOM*. 2000. №2. S. 34-36 (In Russ.).
3. Neupokoeva, A. A., Ivanchenko A. O. Opyt ispol'zovaniya titanovykh splavov v aviastroenii [Experience in the use of titanium alloys in the aircraft industry] // *Novye tekhnologii neftegazovomu regionu: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*, 2010. S. 56-57. (In Russ.)
4. Mironova V.A., Chizhevskaya M.V., Girn A.V., Ravodina D.V., Mikheev A.E. and Khodenkova E.V. Corrosion chemical mechanism in aggressive liquid of MAO coatings based on OT-4 titanium alloys // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 919 (2020) 022058 IOP Publishing. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/919/2/022058> (accessed 10.09.2022).
5. Chizhevskaya M.V., Mironova V.A., Girn A.V. and Khodenkova E.V. Chemical Processes in PEO Coatings Formation and Destruction on Titanium Alloy VT-1. URL: <https://www.scientific.net/KEM.887.332> (accessed 10.09.2022).

© Эргашева М. З., Чижевская М. В., 2022



**Секция**  
**«ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА  
В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

УДК 62.752, 621:534;833; 888.6, 629.4.015;02

## ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Р. С. Большаков<sup>1</sup>, С. К. Каргапольцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 660074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15  
<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Российская Федерация, 660074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*Рассматриваются возможности создания конструктивно-технических решений при формировании вибрационного перемещения рабочей среды за счёт создания пространственных движений рабочего органа вибрационной технологической машины.*

*Ключевые слова: вибрационное перемещение, динамическое состояние, вибрационная технологическая машина, пространственные движения.*

## FEATURES OF VIBRATIONAL MOVEMENT OF THE WORKING ENVIRONMENT

R. S. Bolshakov<sup>1</sup>, S. K. Kargapoltsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University  
15, Chernishevskiy Str., Irkutsk, 660074, Russian Federation  
<sup>2</sup>Irkutsk National Technical University  
83, Lermontov Str., Irkutsk, 660074, Russian Federation  
E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*The possibilities of creating constructive and technical solutions in the formation of the vibrational movement of the working environment due to the creation of spatial movements of the working body of the vibrational technological machine are considered.*

*Keywords: vibrational movement, dynamic state, vibrational technological machine, spatial motions.*

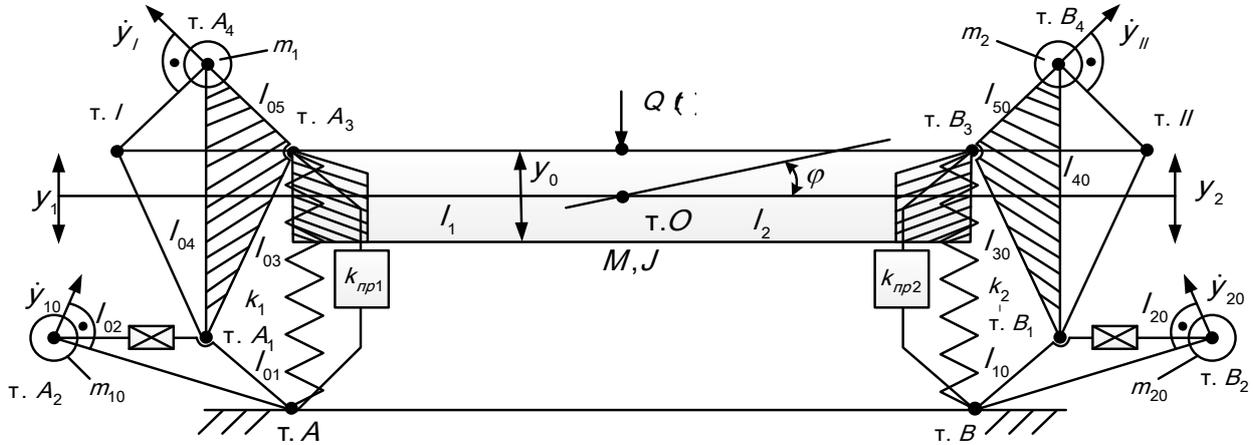
**Введение.** Изготовление промышленной продукции связано как с негативным влиянием вибрационных процессов, так и с их использованием при обработке деталей различной формы, что инициирует поиск и разработку способов и средств контроля вибраций [1 – 3]. В частности, необходимо отметить вибрационные технологии, связанные с вибрационной классификацией деталей, транспортировкой и упрочнением. Все эти операции производятся при использовании вибрационных технологических машин различного назначения [4 – 6].

В предлагаемом докладе рассматриваются особенности конструктивных решений в области формирования перемещения рабочей среды с использованием дополнительных элементов сложной формы.

**I. Общие положения. Постановка задачи.** На рисунке представлена расчётная схема вибрационной технологической машины, представляющая собой механическую колебательную систему с твердым телом на упругих опорах с дополнительными связями в виде рычажных механизмов, соединённых между собой. Механическая колебательная система обладает массой  $M$  и моментом инерции  $J$ , имеет две степени свободы при малых колебаниях относительно положения статического равновесия в системе координат  $y_1, y_2$ , связанной с неподвижным базисом. Технический объект опирается на упруго-рычажные системы, имеющие шарнирные соединения в точках в  $A_1 - A_4, B_1 - B_4$  упругие элементы с жесткостями  $k_1$  и  $k_2$  в точках  $A_3$  и  $B_3$ .

Так как в систему включён ряд дополнительных элементов, оценка динамического состояния несколько сложна. Дополнительные массы представлены следующими параметрами:  $m_1, m_2, m_{10}, m_{20}$

в тт.  $A_2, B_2, A_4, B_4$ . В центре масс (т.  $O$ ) вибрационной технологической машины приложена внешняя сила, имеющая гармонический характер. Концы твёрдого тела находятся на расстоянии длин плеч  $l_1, l_2$  от центра масс рабочего органа технологической машины. Движение системы может быть рассмотрено как в координатах  $y_1, y_2$ , так и в  $y_0, \varphi$  с использованием известных соотношений [5].



Принципиальная вибрационной технологической машины

Математическая модель системы может быть построена при помощи выражений для кинетической и потенциальной энергий с использованием уравнения Лагранжа 2-го рода нахождения скоростей движения элементов  $\dot{y}_I, \dot{y}_{II}, \dot{y}_{10}, \dot{y}_{20}$  упруго-рычажных структур  $m_1, m_2, m_{10}$  и  $m_{20}$  с использованием понятий о мгновенных центрах скоростей, когда необходимы дополнительные геометрические построения.

**II. Особенности формирования динамического состояния системы.**

На основе данных о скоростях движения элементов и конструктивно-технических решениях получим соотношения  $\dot{y}_I = a_{01}\dot{y}_1, \dot{y}_{II} = b_{01}\dot{y}_2, \dot{y}_{10} = a_{10}\dot{y}_1, \dot{y}_{20} = b_{10}\dot{y}_2$ , использование которых позволяет получить выражение для кинетической энергии

$$T = \frac{1}{2} M(a\dot{y}_1 + b\dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2} Jc^2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} m_1 a_I^2 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_{II}^2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_{10} a_{10}^2 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_{20} a_{20}^2 \dot{y}_2^2. \quad (1)$$

Для определения потенциальной энергии системы необходимо принимать во внимание детализированные представления относительно дополнительных упругих элементов с обобщёнными жесткостями  $k_{01}$  и  $k_{02}$ , а также демпфирующих соединительных звеньях с коэффициентами демпфирования  $b_1$  и  $b_2$ . Выражение для приведённой жёсткости в этом случае примет вид

$$k_{np1} = \frac{k_{01}(k_{02} + b_1 p)}{k_{01} + k_{02} + b_1 p}. \quad (2)$$

Если  $b_1 \rightarrow 0$ , то

$$k_{np1} = \frac{k_{01} k_{02}}{k_{01} + k_{02}}. \quad (3)$$

При  $b_1 \rightarrow \infty - k_{np1} = k_{01}$ .

На основании выражений (3) и (6) может быть построена математическая модель движения системы в виде системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами

$$\Pi = \frac{1}{2} (k_1 + k_{np1}) y_1^2 + \frac{1}{2} (k_2 + k_{np2}) y_2^2, \quad (4)$$

где  $k_{np1} = \frac{k_{01}(k_{02} + b_1 p)}{k_{01} + k_{02} + b_1 p}, k_{np2} = \frac{k_{10}(k_{20} + b_2 p)}{k_{10} + k_{20} + b_2 p}$ .

### **Заключение.**

Рассмотренный вариант модернизации вибрационной технологической машины со дополнительными блоками сложной формы позволяет получать специфические формы амплитуд колебаний рабочего органа за счёт возможностей варьирования параметрами элементов, входящих в эти блоки. Построенные передаточные функции системы показывают, что динамические свойства системы зависят от параметров введённых масс и плеч рычагов, межпарциальная связь между координатами крайних точек позволяют получить технологический режим, при котором отсутствуют угловые колебания.

### **Библиографические ссылки**

1. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. М.: Машиностроение, 1968. 362 с.
2. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей в абразивной среде. М.: Машиностроение. 1968 92 с.
3. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография / Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. 569 с.
4. Bolshakov, R. S. Unilateral Constraints in Interactions of System Elements: Estimation of Dynamic Constraint Reactions / R. S. Bolshakov, S. V. Eliseev, I. S. Sitov // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Серия: LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING, Chelyabinsk, 18–22 мая 2020 года. Chelyabinsk: Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 2021. P. 851-860. DOI 10.1007/978-3-030-54814-8\_98.
5. Большаков Р.С. Особенности вибрационных состояний транспортных и технологических машин. Динамические реакции и формы взаимодействия элементов. Новосибирск: Наука. 2020. 411 с.
6. Особенности динамики вибрационных технологических машин: системный анализ, структурное моделирование, рычажные связи / С. В. Елисеев, С. К. Каргапольцев, Р. С. Большаков, А. В. Елисеев // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 4(48). С. 12-19. DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-12-19.

### **References**

1. Bykhovsky I.I. Osnovy teorii vibracionnoj tehniky [Fundamentals of the theory of vibration technology] / I.I. Bykhovsky. M.: Mashinostroenie, 1968. 362 p.
2. Babichev A.P. Vibracionnaja obrabotka detalej v abrazivnoj srede [Vibration processing of parts in an abrasive environment]. M.: Mashinostroenie. 1968 92 p.
3. Kopylov Yu.R. Dinamika processov vibroudarnogo uprochnenija [Dynamics of processes of vibro-impact hardening: monograph] / Voronezh: CPI "Scientific book", 2011. 569 p.
4. Bol'shakov R.S. Osobennosti vibracionnyh sostojanij transportnyh i tehnologicheskikh mashin. Dinamicheskie reakcii i formy vzaimodejstvija jelementov [Features of vibration states of transport and technological machines. Dynamic reactions and forms of interaction of elements]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2020, 411 p.
5. Bolshakov, R. S. Unilateral Constraints in Interactions of System Elements: Estimation of Dynamic Constraint Reactions / R. S. Bolshakov, S. V. Eliseev, I. S. Sitov // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Серия: LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING, Chelyabinsk, 18–22 мая 2020 года. Chelyabinsk: Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 2021. P. 851-860. DOI 10.1007/978-3-030-54814-8\_98. EDN EMBCML.
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.

© Большаков Р. С., Каргапольцев С. К., 2022

УДК 621.791.725

## КАЧЕСТВО СВАРНОГО ШВА ЗАГОТОВКИ ГИБКОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СЕКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. С. Вервейко<sup>1</sup>, В. Я. Браверман<sup>2</sup>, С. К. Злобин<sup>1</sup>, В. Ю. Гусев<sup>1</sup>, В. В. Оборонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
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 «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева ведутся исследования обеспечения герметичности сварного соединения заготовок гибких волноводных секций космических аппаратов из материала БрВ2 толщиной 0,1 мм, выполненных методом лазерной сварки.*

*Ключевые слова: качество, сварной шов, гибкая секция, герметичность, лазерная сварка*

## QUALITY OF A WELDED JOINT OF A BLANCK OF A FLEXIBLE WAVEGUIDE SECTION OF A SPACE VEHICLE

D. S. Verveyko<sup>1</sup>, V. Ya. Braverman<sup>2</sup>, S. K. Zlobin<sup>1</sup>, V. U. Gusev<sup>1</sup>, V. V. Oboronov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC 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

*At present, research is being carried out at JSC «ISS» named after academician M. F. Reshetnev to ensure the tightness of the welded joint of workpieces of flexible waveguide sections of spacecraft from the material BrV2 with a thickness of 0,1 mm, made by laser welding.*

*Keywords: quality, weld, flexible section, tightness, laser welding*

Выполнение высоких требований мировых стандартов при изготовлении гибких волноводных секций космических аппаратов является приоритетной задачей предприятия АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева.

Выявление различных дефектов волновода, не соответствующих требованиям конструкторской документации достигается пооперационным контролем при изготовлении гибких волноводов. Контрольная операция позволяет сделать заключение о соответствии детали, а также при появлении дефектов разработать корректирующие действия по их устранению.

При изготовлении заготовки гибкой волноводной секции (ГВС) с применением сборки, методом лазерной сварки продольным швом требуется обеспечить качество заготовки после операции сварки. Методы контроля по выявлению дефектов сварного соединения заготовки ГВС должны выявлять брак до выполнения трудоёмкой операции формования.

Лазерная сварка – это процесс, при котором в малый объём обрабатываемого материала вводится количество энергии высококонцентрированным источником теплоты. Соблюдение режима сварки является необходимым условием для формирования качественного сварного соединения, так при недостатке энергии образуется непровар, а при избыточном прожог.

Также причинами появления сквозных дефектов (рис. 1) могут быть: сбой в работе оборудования, нарушение размеров листовой заготовки, подготовки заготовки до сварки, механическое замятие

кромок при сборке и неплотное прилегание свариваемых кромок, которое возникает при физическом износе средств технологического оснащения [4].



Рис. 1. Внешний вид прожогов заготовки ГВС наружный (левый) и внутренний вид (правый)

Проверка качества сварного соединения заготовок ГВС проверяется несколькими видами контроля. Во-первых, визуальным контролем с помощью эндоскопа в диапазоне 8 – 10 кратного увеличения. Во-вторых, проверкой герметичности заготовки давлением 0,345 бар методом «аквариума».

В настоящее время на предприятии АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева проводится работы по обеспечению качества сварного соединения заготовок гибких волноводных секций космических аппаратов из материала БрБ2 толщиной 0,1 мм из медного сплава БрБ2 ДПРНМ ГОСТ1789-13.

#### Библиографические ссылки

1. Фортецькю П. Разработка систем космических аппаратов. М.: Альпина Паблишер, 2016. 685 с.
2. Румянцев С. В., Добромислов В. А. Неразрушающие методы контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 1976. 7 с.
3. Волченко В. Н. Контроль качества сварки. М.: Машиностроение, 1975. 10 с.
4. ОСТ 92-1741-90. Сварка и сваркопайка лазерная импульсная. 2 с.
5. Назаров С. Т. Методы контроля качества сварных соединений. М.: Машиностроение, 1964. 35 с.

#### References

1. Fortesk'y'u P. Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov. M.: Al'pina Pablsher, 2016. 685 p.
2. Rumyantsev S. V., Dobromyslov V. A. Nerazrushayushchie metody kontrolya svarnykh soedineniy. M.: Mashinostroenie, 1976. 7 p.
3. Volchenko V. N. Kontrol' kachestva svarki. M.: Mashinostroenie, 1975. 10 p.
4. OST 92-1741-90. Svarka i svarkopayka lazernaya impul'snaya. 2 p.
5. Nazarov S. Metody kontrolya kachestva svarnykh soedineniy. M.: Mashinostroenie, 1964. 35 p.

© Вервейко Д. С., Браверман В. Я., Злобин С. К.,  
Гусев В. Ю., Оборонов В. В., 2022

УДК621.91.01

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. И. Гордеев<sup>1</sup>, А. С. Бинчуров<sup>1,2\*</sup>, М. С. Вакулин<sup>1</sup>, Н. И. Усевич<sup>2</sup>, И. С. Казаков<sup>2</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

*Исследованы особенности высокоскоростной обработки композиционных материалов и получены полуэмпирические расчетные формулы для определения параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  в зависимости от режимов резания.*

*Ключевые слова: фрезерование, композиционные материалы, параметры шероховатости, многолезвийные фрезы.*

## INFLUENCE OF CUTTING CONDITIONS ON SURFACE ROUGHNESS DURING HIGH-SPEED MILLING OF COMPOSITE MATERIALS

Y. I. Gordeev<sup>1</sup>, A. S. Binchurov<sup>1,2\*</sup>, M. S. Vakulin<sup>1</sup>, N. I. Usevich<sup>1</sup>, I. S. Kazakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

26 Kirenskogo, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

<sup>2</sup>Aerokosmicheskyy College of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: mexanixs@mail.ru

*The features of high-speed processing of composite materials have been studied and semi-empirical calculation formulas have been obtained for determining the roughness parameters  $R_a$ ,  $R_z$  depending on the cutting conditions.*

*Keywords: milling, composite materials, roughness parameters, multi-blade cutters.*

Современные композиционные материалы (КМ) имеют преимущества перед сталями и сплавами по удельной прочности, модулю упругости, коррозионной стойкости (это объясняет их широкое применение в аэрокосмической отрасли). Анизотропия структуры и свойств волокнистых КМ (углепластиков, стеклопластиков) приводит к технологическим проблемам обеспечения требуемого качества поверхностей при резании из-за термодеструкции и деламинации связующего, непрорезания и вытягивания волокон, соответствующих вибраций и снижения стойкости режущего инструмента [1]. Известны способы повышения качества обработки ВКМ: высокоскоростное прецизионное фрезерование, оптимизация режимов резания и геометрии режущей части инструмента [2, 3]. Актуальность проведения исследований в этом направлении объясняется также и тем, что, в большинстве случаев, изделия из КМ имеют свою оригинальную структуру и морфологию, а значит, не существуют универсальных способов, инструментов и технологических режимов для их обработки резанием.

Цель работы – определение рациональных режимов резания для периферийного фрезерования поверхностей деталей из волокнистых композиционных материалов.

Экспериментальные исследования проводились на роботе – манипуляторе Kuka KR 90 R3100 extra НА. При проведении экспериментальных исследований влияния режимов резания на параметры шероховатости использовались образцы из углепластика. На основании анализа однофакторных экспериментов были выбраны уровни варьирования независимых переменных для дальнейших экспери-

ментальных исследований по плану ПЭФ:  $S = 200 \dots 800$  мм/мин;  $V = 125,6 \dots 376,8$  м/мин;  $t = 0,1 \dots 0,5$  мм. Качество обработанной поверхности образцов оценивалось по двум высотным параметрам шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  на профилометре модели Tr 220 (КНР), диапазон измерений 160 мкм (от -80 до +80 мкм). Анализ микроструктуры образцов и морфологии стружки проводился на растровом электронном микроскопе HITACHI TM 1000. В качестве инструмента использовались оригинальные конструкции многолезвийных фрез – роутеров [1] в сравнении с аналогами фирм SANDVIK и ISCAR. Качество обрабатываемой поверхности зависит от многих технологических параметров обработки (режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента и др. В процессе экспериментальных исследований было установлено, что глубина резания  $t$  не оказывает существенного влияния на изменение параметров шероховатости поверхностей стеклопластиков и углепластиков при периферийном фрезеровании. Наибольшее влияние на формирование высотных параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  оказывают продольная подача  $S_{np}$  и скорость резания  $V_p$  – рис. 1.

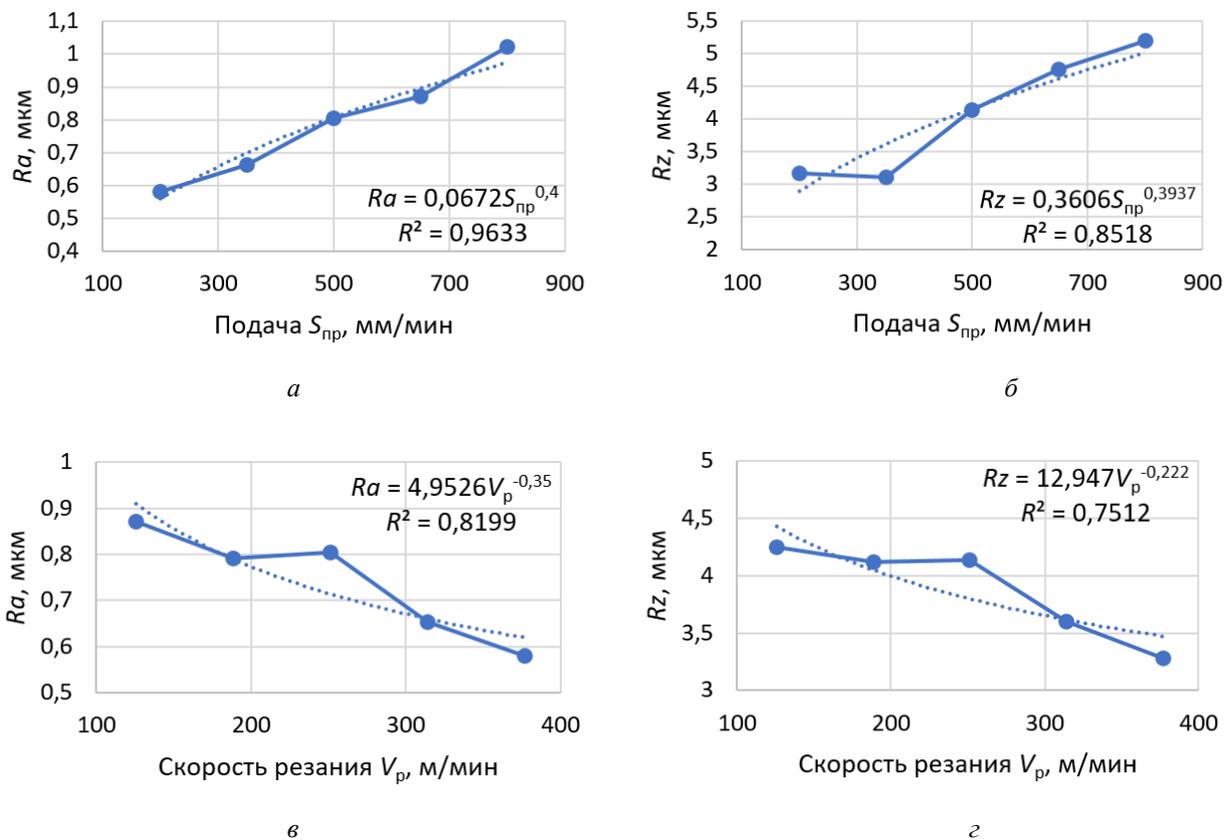


Рис. 1. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности по параметрам  $Ra$ ,  $Rz$ : а, б – продольной подачи,  $S_{np}$ ; в, г – скорости резания,  $V_p$

На основании экспериментальных данных получены эмпирические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов резания:

$$Ra = 0,425 \frac{S_{np}^{0,4}}{V_p^{0,35} \cdot t^{0,0038}}; \quad Rz = 1,183 \frac{S_{np}^{0,3937} \cdot t^{0,0042}}{V_p^{0,222}}.$$

Электронно–микроскопическими исследованиями подтверждена возможность повышения качества обработки волокнистых композитов при использовании новой конструкции многолезвийной фрезы. Изображения поверхностей показывают, что обеспечивается эффективный поперечный срез волокон (рисунок 2). Это можно объяснить увеличенной частотой циклов срезания (до 4000-6000  $s^{-1}$ ). Косвенным подтверждением эффективности работы инструмента является морфология стружки – ее размеры варьируются в диапазоне от 3 до 8 мкм (рисунок 2 а), то есть коррелируют с шероховатостью обработанной поверхности (рисунок 2б).

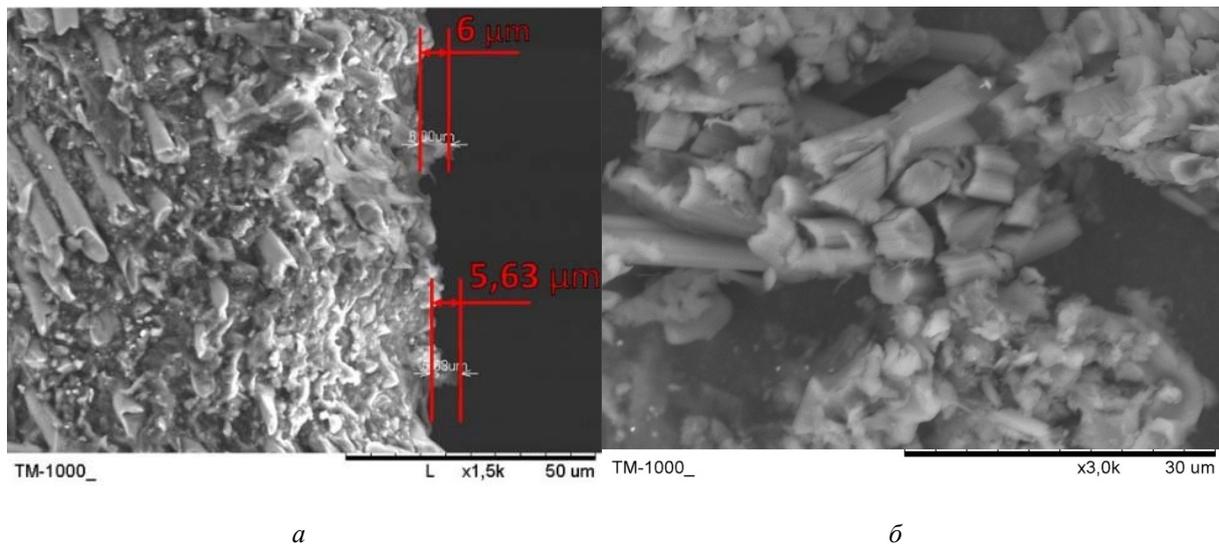


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения топографии поверхностей композитов (а – стеклопластика) и морфология стружки (б – углепластика)

Применение высокоскоростной обработки деталей из композиционных материалов подтверждает эффективность использования новых конструкций многолезвийных фрез.

#### Библиографические ссылки

1. Vakulin M. S., Gordeev Y. I., Yasinsky V. B. Design of tools with the cutting part of the original profile for high-speed milling //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Т. 754. №. 1. С. 012008.
2. Shchurov I. A., Nikonov A. V., Boldyrev I. S. SPH-simulation of the fiber-reinforced composite work-piece cutting for the surface quality improvement //Procedia Engineering. 2016. Т. 150. С. 860-865.
3. Indakov N.S., Binchurov A.S. Turning by multifaceted cutters. *Russian Engineering Research*, 2014, Vol. 34, No. 1, pp. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080.

#### References

1. Vakulin M. S., Gordeev Y. I., Yasinsky V. B. Design of tools with the cutting part of the original profile for high-speed milling //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Т. 754. №. 1. С. 012008.
2. Shchurov I. A., Nikonov A. V., Boldyrev I. S. SPH-simulation of the fiber-reinforced composite work-piece cutting for the surface quality improvement //Procedia Engineering. 2016. Т. 150. С. 860-865.
3. Indakov N.S., Binchurov A.S. Turning by multifaceted cutters. *Russian Engineering Research*, 2014, Vol. 34, No. 1, pp. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080.

© Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Вакулин М. С., Усевич Н. И., Казаков И. С., 2022

УДК 621.9-115

## МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Ю. И. Гордеев<sup>1</sup>, А. С. Бинчуров<sup>1,2\*</sup>, Д. А. Кривов<sup>1</sup>, С. В. Филиппов<sup>1</sup>, П. В. Тимошев<sup>2</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

*Модернизирована конструкция сборной валковой дробилки с рабочими органами в форме РК-профиля. Данная конструктивное исполнение позволяет повысить производительность процесса дробления – измельчения сливной стружки.*

*Ключевые слова: измельчение, валковая дробилка, РК-профиль.*

## MODERNIZATION OF THE DESIGN OF THE WORKING BODIES OF THE ROLLER CRUSHER

Y. I. Gordeev<sup>1</sup>, A. S. Binchurov<sup>1,2\*</sup>, D. A. Krivov<sup>1</sup>, S. V. Filippov<sup>1</sup>, P. V. Timoshev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

26 Kirenskogo, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

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

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

\*E-mail: mexanixs@mail.ru

*The design of a combined roller crusher with working bodies in the form of a PK profile has been modernized. This design allows you to increase the productivity of the crushing process – grinding of drain chips.*

*Keywords: grinding, roller crusher, RC-profile.*

В процессе механической обработки деталей из вязких и пластичных материалов (алюминий и титан) формируется большое количество отходов в виде сливной стружки. Задача переработки, транспортировки и утилизации являются актуальной и практической значимой. Дальнейшее дробление сливной стружки известными методами затруднительно по причине высокой пластичности измельчаемых материалов [1].

Цель работы заключается в повышении интенсивности измельчения, предотвращении заклинивания дробимого материала в щелевом зазоре между рабочими органами.

В качестве технического решения проблемы предлагается сборная конструкция валковой дробилки. Особенности конструкции заключается в том, что валки имеют форму РК – профиля (треугольника Рело) и синхронно вращаются навстречу друг другу. Валковая дробилка (рис. 1а) состоит из параллельных сборных валков 1, 2, собранных из дисков в форме РК – профиля на валы 3, 4 с рабочими поверхностями в форме шестигранника, что позволяет устанавливать диски на встречно вращающихся валах 3, 4 со смещением профиля дисков относительно друг друга с углом 60° на каждом из валов. Валы 3, 4 устанавливаются в подшипниковые опоры 5, 5\*, 6, 6\* которые имеют возможность перемещения по направляющим 7, 8 корпуса для регулировки зазора между поверхностями дисков 1n, 2n, (рис. 1б) причем опоры 6, 6\* вала 1 выполнены подвижными за счёт блока пружин 9 [2].

Система сил, реализуемая в зоне измельчения между сборными валками с наборными дисками в виде РК-профилей, смещенных друг относительно друга на 60° является знакопеременной, циклической (в отличие от постоянной схемы нагружения между двумя цельными валками) (рис. 2).

Сложное напряжено – деформированное состояние, возникающее между валками образовано в результате действия сил сжатия, сдвига, срезания – скалывания (рис. 3). Очевидно, что это позволяет повысить интенсивность измельчения, в том числе за счет совмещения различных механизмов разрушения материала: сжатия, растяжения, истирания, ударного воздействия, резания – скалывания и постоянного изменения направления векторов этих сил и их результирующих [3].

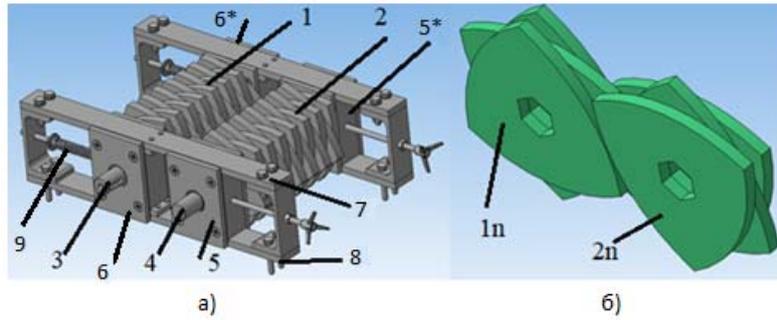


Рис. 1. Конструкция валковой дробилки

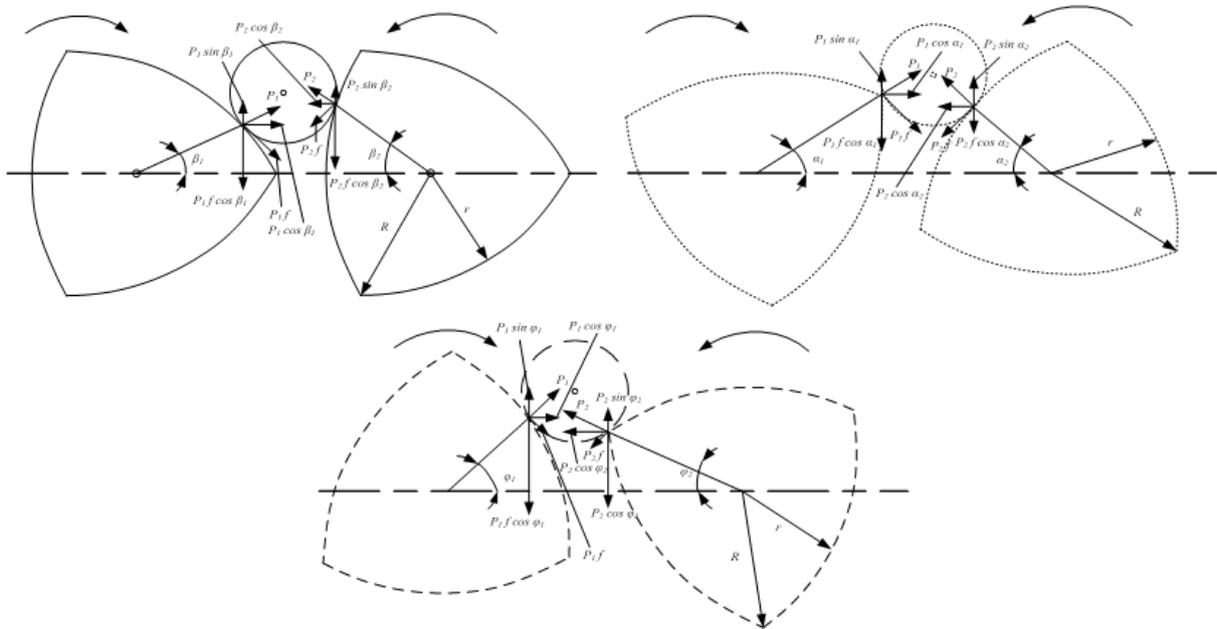


Рис. 2. Системы сил в зоне измельчения

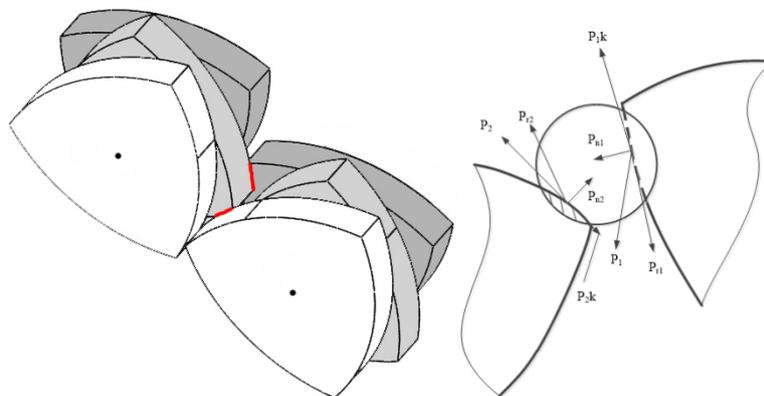


Рис. 3. Схема расчета действия сил сжатия, сдвига, срезания – скалывания

Частота вращения валков, соответствующая этой результирующей скорости, учитывается в формуле расчета производительности измельчения

$$Q = C_Q \times D^{2,0} \times n \times K_1 \times K_2 \times \dots \times K_i \quad (1)$$

где  $K_1, K_2, K_i$  – коэффициенты зависящие от особенностей геометрии размеров материала, щелевого зазора, прочностных свойств материала и т.д.

Расчеты, проведенные в соответствии с новой кинематической схемой, реализуемой в заявляемой конструкции и общепринятыми методиками аналитического расчёта показывает, что производительность в сравнение с аналогами увеличивается с 160 до 312 г/с.

В конструкции реализуется сложная система сил (сжатие, трения, знакопеременных циклических нагрузок, сил резания), позволяющая повысить производительность процесса дробления – измельчения.

### Библиографические ссылки

1. Сиваченко Л., Добровольский Ю. История развития и современный уровень техники измельчения. Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. №4 (37). С. 69-76.
2. Кривов Д. А., Гордеев Ю. И. Разработка принципиальной схемы дробилки с валками в форме РК-профиля //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. №. 7. С. 78–82.
3. Krivov D. A. Gordeev, Y. I., Krivova, D. D., & Chzhan, E. A. Simulation of the stress-strain state of the combined rolls plates in the form of a Reuleaux Triangle Profile roller grinder //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. T. 1353. №. 1. С. 012076.

### References

1. Sivachenko L., Dobrovolskiy Y. History of development and modern level of grinding technology. Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2012. No. 4 (37). p. 69-76.
2. Krivov D.A., Gordeev Y. I. Development of a schematic diagram of a crusher with rolls in the form of an EC-profile // Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2017. no. 7, p. 78–82.
3. Krivov D. A. Gordeev, Y. I., Krivova, D. D., & Chzhan, E. A. Simulation of the stress-strain state of the combined rolls plates in the form of a Reuleaux Triangle Profile roller grinder //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. T. 1353. №. 1. С. 012076.

© Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Кривов Д. А., Филиппов С. В., Тимошев П. В., 2022

УДК 629.7

## ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Д. А. Горшкалев\*, А. П. Исаев, 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: gorshkalev1999@mail.ru

*В рамках работы рассмотрены недостатки различных видов композиционных материалов, а также общие проблемы, ограничивающие их применение при изготовлении изделий ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: композитные материалы, свойства материалов, ракетно-космическая техника.*

## ISSUES OF USING COMPOSITE MATERIALS IN THE MANUFACTURE OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

D. A. Gorshkalev\*, A. P. Isaev, N. A. Amelchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: gorshkalev1999@mail.ru

*This work considers disadvantages of various types of composite materials, as well as general problems that limit their use in the manufacture of rocket and space technology products.*

*Keywords: composite materials, properties of materials, rocket and space technology.*

Композиционные материалы – это материалы, изготовленные из двух или более компонентов с существенно различающимися физическими или химическими свойствами. Варьируя состав матрицы и наполнителя и их соотношение, получают широкий спектр материалов с требуемыми свойствами. Благодаря высоким показателям эксплуатации, композиционные материалы получают всё более широкое распространение в разных сферах промышленности, в том числе при изготовлении ракетно-космической техники. Однако помимо положительных качеств, существуют и проблемы использования композитных материалов. Цель данной работы – рассмотреть недостатки различных видов композиционных материалов, а также общие проблемы, ограничивающие их применение при изготовлении изделий ракетно-космической техники.

Стеклопластики – материалы, состоящие из стекловолокнутого наполнителя и связующего полимера. Они обладают высокой прочностью и небольшим весом, очень низкой теплопроводностью, что делает их пригодными для изготовления различных корпусных изделий (в частности, они применяются для изготовления корпусов ракетных двигателей твердого топлива). Однако, их использование в аэрокосмической промышленности ограничено тем, что данные композитные материалы не выдерживают высоких температур, и при температуре свыше 200 композит начинает терять свои эксплуатационные характеристики. Кроме того, стеклопластик обладает низким модулем упругости, из-за чего может легко изгибаться.

Углепластики – полимерные материалы, который представляет собой соединение углеродных волокон и полимеров. Они обладают низкой плотностью, высоким модулем упругости, почти нулевым коэффициентом линейного расширения. Одной из главных проблем использования углепластиков является длительный процесс изготовления, при котором необходимо строго придерживаться технологических параметров. Изделия из углепластика необходимо покрывать специальными средствами, так как материал способен выцветать и выгорать под действием солнечных лучей. Все это делает исполь-

зование данного композиционного материала достаточно дорогим. Немаловажной проблемой также является чувствительность данного композита к точечным и сильным ударам. Кроме того, при контакте углепластика со сталью у последней провоцируется коррозия, поэтому в таких местах необходимо делать специальные вставки (обычно их изготавливают из стеклопластика). Из данного полимерного материала были изготовлены несущие обшивки в ракетах космического назначения (РКН) «Pegasus» и «Minotaur IV» [1].

Органопластики – полимерные композитные материалы, в которых наполнителем служат, в основном, синтетические волокна (чаще арамидные волокна), иногда применяется природный материал. Органопластики легкие, хорошо сопротивляются динамическим нагрузкам, обладают низкой плотностью. Прочность на растяжение у органопластиков велика, однако прочность при сжатии ниже в 5-10 раз.

Важнейшая проблема данного композитного материала – низкие сроки эксплуатации, поскольку материал сильно подвержен старению. Производители органопластиков устанавливают сроки годности до 5 лет, при определенных способах обработки – 10 лет. Кроме того, для органопластиков характерно снижение прочностных характеристик при повышенной влажности. Так, данный композитный материал использовался в качестве обшивки для переходных отсеков второй ступени РКН «Протон-М».

Текстолиды – слоистые композитные материалы, где в качестве арматуры используется ткань из различных волокон, которая пропитывается смолой, а затем прессуется. Свойства текстолидов могут быть разными и зависят от наполнителя. Общим недостатком данных материалов является взрывоопасная пыль, выделяемая при механической обработке, из-за чего предъявляются особые требования к рабочему помещению. Кроме того, текстолит – материал, который подвержен химическим воздействиям, в некоторых случаях его необходимо покрывать специальной защитой [2].

В качестве композиционных материалов на основе металлической матрицы (МКМ) используют алюминий, магний, медь и никель. Среди удачных металлических композиций стоит выделить бор-алюминий, используемый при изготовлении стрингеров, лонжеронов, шасси самолетов, стержней и рам в ракетно-космической технике. Несмотря на обширные достоинства в виде высокой прочности, упругости и сопротивления усталости в широком диапазоне температур, металлические композитные материалы обладают таким недостатком, как низкое сопротивление межслойному сдвигу.

Композиционные волокнистые материалы с металлической матрицей (МВКМ) применяют при различных температурах, в агрессивных средах, при статических, циклических, вибрационных и других нагрузках. Так, использование МВКМ на основе алюминия в узлах и основных деталях летательных аппаратов позволяет достичь снижения массы на 20-60%. В качестве недостатков при изготовлении МВКМ выделяют неравномерность распределения коротких волокон по объему изделия, возможности повреждения хрупких волокон при уплотнении или деформации МВКМ, а также повышенное содержание нежелательных примесей (например, оксиды) [3].

Отмечаются общие проблемы использования композиционных материалов. Например, затруднителен расчет конструкций на основе композиционных материалов в системах автоматизированного проектирования, особенно в отечественных. Так, отмечается нехватка нормативно-технической литературы и надежного расчетного аппарата, которые бы позволили оптимально проектировать конструкции; неучет специфических свойств композиционных материалов, помимо анизотропии и неоднородности; отсутствие сортамента композиционных материалов в библиотеках программ, который бы позволил ускорить процесс проектирования и упростить расчет; проблема расчета на расслоение композиционных материалов; сложность моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций из композиционных материалов при статических и динамических нагрузках с точки зрения механики деформированного твердого тела и программирования.

Кроме того, наблюдается проблема нехватки научно-технической базы для исследований композитов, поскольку они обладают анизотропными или ортотропными свойствами, некоторые из них являются неоднородной, несплошной средой и имеют ряд других специфических свойств. В связи с этим оборудование, применяемое для испытаний традиционных материалов, не подходит для композиционных материалов. Новое испытательное оборудование требует и высококачественного компьютерного программного обеспечения для анализа и обработки результатов, полученных в процессе экспериментов. Одновременно необходимы специалисты, которые смогли бы проводить такого вида испытания и обрабатывать результаты опытов [4].

### Библиографические ссылки

1. Анализ номенклатуры композитных агрегатов ракет космического назначения и применяемых для них конструктивно-силовых схем / Кондратьев А. В., Дмитренко А. Г., Стэнлиэ А. Г. и др. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2014. №3 (79). С. 19–30.
2. Жилинская А. М. Проблемы массового использования композитных материалов // Мосты и тоннели: материалы 74-й Студенческой научно-технической конференции. БНТУ. Минск, 2018. С. 16-24.
3. Технология производства композитных конструкций ракетно-космической техники [Электронный ресурс]. URL: <http://engineering-science.ru/doc/398498.html> (дата обращения 12.9.2022).
4. Семёнов В.В., Буторов И.А. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в промышленном и гражданском строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 4 (19). С. 129–137.

### References

1. Kondratyev A. V., Dmitrienko A. G., Stanilye A. G., Tsaritsynskyy A. A. [Analysis of composite assemblies nomenclature and structural power schemes for space rockets]. *Issues of aircraft structure design and production*. 2014. no. 3, p. 19-30 (In Russ.).
2. Zhilinskaya A. M. Problems of mass use of composite materials // Bridges and tunnels: materials of the 74th Student scientific and technical conference. BNTU. Minsk, 2018. P. 16-24.
3. Manufacturing technique of composite construction of rocket-and-space machines. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/398498.html> (accessed 12.09.2022).
4. Semyonov V.V., Butorov I.A. [Problems of application of polymer composite materials in industrial and civil construction]. *Izvestiya vuzov. Investments. Construction. Real estate*. 2016, no. 4, p. 129–137 (In Russ.).

© Горшкалев Д. А., Исаев А. П., Амельченко Н. А., 2022

УДК 678

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ПЕЧАТИ МОДЕЛИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Д. А. Горшкалев\*, 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: gorshkalev1999@mail.ru

*В рамках работы исследовано получение различных диаметральных размеров при печати методом послойного наплавления. Результаты работы могут быть полезны при проектировании моделей для изготовления изделий в машиностроении.*

*Ключевые слова: моделирование методом послойного наплавления (FDM, FFF), аддитивные технологии, диаметральные размеры, точность размеров.*

## FEATURES OF OBTAINING DIAMETRICAL DIMENSIONS WHEN PRINTING A MODEL BY THE FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

D. A. Gorshkalev\*, N. A. Amelchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: gorshkalev1999@mail.ru

*This work considers obtaining various diametrical dimensions when printing by the fused deposition modeling. The results of the work can be useful in designing models for the manufacture of products in mechanical engineering.*

*Keywords: fused deposition modeling (FDM, FFF), additive technologies, diametrical dimensions, dimensional accuracy.*

В настоящее время в различных отраслях машиностроения интенсивно развиваются и внедряются перспективные технологии послойного синтеза деталей из разных материалов (FDM, FFF и др.). Идеология аддитивных технологий базируется на цифровых технологиях, в основе которых лежит цифровое описание изделия – трехмерная CAD-модель.

Наличие широкого ассортимента полимерных и металлических материалов позволяет быстро создавать модели, формы, мастер-модели и так далее путем фиксации слоев модельного материала и их последовательного соединения между собой различными способами: спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией – в зависимости от нюансов конкретной технологии [1].

Тем не менее, в области аддитивных технологий, существует довольно широкий спектр малоисследованных направлений. В частности, одной из проблем является получение диаметральных размеров геометрических элементов (ГЭ) с заданной точностью.

Целью настоящей работы является выявление причин, вызывающих появление отклонения формы ГЭ и точности при печати методом послойного наплавления (FDM).

Исследования проводились методом создания натуральных образцов. На рисунке 1 представлена модель для проведения исследований, имеющая наружные и внутренние ГЭ (сквозные отверстия и бошки) с номинальными значениями размеров от 2,5 до 40 мм.

Эксперимент проводился с помощью 3D-принтера Wanhao D12/230, в котором реализована кинематическая схема "Prusa". Печатающая головка в данной схеме движется по осям X и Z, а платформа с формируемым образцом по оси Y. Для качественной печати при такой кинематике следует задавать небольшую скорость [2]. В качестве материала для печати использовали пластик PLA (полилактид), объемная усадка которого не превышает 0,5% [3]. В качестве измерительного инструмента для изме-

рения точности и отклонений формы ГЭ использовали штангенциркуль ШЦ-I-150-0,02 (допускаемая погрешность  $\pm 0,03$  мм).

В связи с явным отклонением формы полученных элементов от цилиндрической, замеры диаметральных размеров осуществлялись в 4 направлениях с шагом около  $45^\circ$ . Результаты замеров приведены в таблице 2.

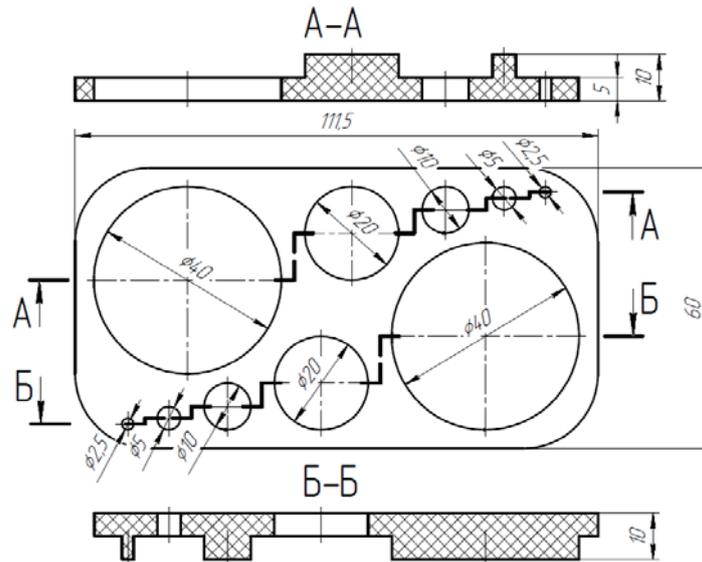


Рис. 1. Модель для эксперимента

Данная модель была напечатана при технологическом режиме, приведенном в таблице 1.

Таблица 1

**Технологический режим при проведении эксперимента**

Скорость заполнения и печати внешних стенок, мм/с	45
Скорость печати внутренних стенок, крышки и дна, мм/с	22,5
Скорость холостого перемещения, мм/с	90
Высота слоя, мм	0,2
Ширина линии, мм	0,4
Толщина стенки, дна, крышки, мм	0,8
Плотность заполнения (шаблон сетка), %	20

Таблица 2

**Полученные диаметральные размеры, мм**

Размер	Внутренний						Наружный					
	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Замер 4	Размах	Среднее	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Замер 4	Размах	Среднее
φ2,5	2,10	2,06	2,16	2,00	0,16	2,08	2,32	2,42	2,34	2,46	0,14	2,39
φ5	4,60	4,64	4,70	4,52	0,18	4,62	4,62	4,78	4,64	4,74	0,16	4,70
φ10	9,66	9,68	9,72	9,50	0,22	9,64	9,70	9,86	9,80	9,82	0,16	9,80
φ20	19,58	19,60	19,80	19,48	0,32	19,62	19,78	19,84	19,82	19,70	0,14	19,79
φ40	39,50	39,52	39,66	39,40	0,26	39,52	39,70	39,80	39,82	39,70	0,12	39,76

Из таблицы 2 следует, что все диаметральные размеры получились меньше номинальных, при этом наружные размеры ГЭ получились заметно ближе к номинальным, чем внутренние. Данное явление нельзя объяснить одной объемной усадкой материала, поскольку не прослеживается взаимосвязь между величиной размера и значением его отклонения от номинала. В результате анализа по-

лученных данных был сделан вывод, что большое влияние на отклонения размеров оказывают особенности технологии (аппроксимация движения при получении круглых поверхностей), особенности построения задания для печати (порядок печати элементов, ориентация модели), а также ряд случайных факторов, к которым можно отнести местные подтеки материала вследствие колебания температур, смещение наплавленного слоя в связи с низкой адгезией и др.

Была предпринята попытка приблизить значения диаметральных размеров к номинальным. На основе данных таблицы 2 было рассчитано, что среднее отклонение внутренних диаметральных размеров от номинала составляет около 0,4 мм, а наружных – около 0,2 мм. Поэтому модель (рис. 1) была изменена и напечатана с учетом данных поправок. Результаты замеров исправленной модели приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Полученные диаметральные размеры у исправленной модели, мм**

Размер	Внутренний						Наружный					
	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Замер 4	Размах	Среднее	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Замер 4	Размах	Среднее
ø2,5	2,40	2,54	2,44	2,38	0,16	2,44	2,44	2,48	2,40	2,54	0,14	2,47
ø5	5,04	5,12	5,00	4,98	0,14	5,04	4,80	4,86	4,86	4,94	0,14	4,87
ø10	10,04	10,10	10,12	9,92	0,20	10,05	9,90	10,00	9,96	9,94	0,10	9,95
ø20	20,00	20,12	20,20	19,90	0,30	20,06	19,96	20,02	20,00	19,88	0,14	19,97
ø40	39,94	40,00	40,06	39,84	0,22	39,96	39,90	39,92	40,02	39,82	0,20	39,92

Как следует из таблицы 3, значения диаметральные размеры получились существенно ближе к номинальным и находятся в рамках 13-14 квалитетов.

Таким образом выявлено, что для получения более точных диаметральных размеров необходимо вносить поправки в их значения на 3Д-модели.

### Библиографические ссылки

1. 3Dprintstory [Электронный ресурс]. URL: <https://3dprintstory.org> (дата обращения 04.09.2022).
2. 3DIY [Электронный ресурс]. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/raznovidnosti-kinematik-fdm-3d-printerov/> (дата обращения 05.09.2022).
3. Vektorus [Электронный ресурс]. URL: <https://vektorus.ru/blog/usadka-pla-plastika-pri-pechati.html> (дата обращения 05.09.2022).

### References

1. 3Dprintstory. Available at: <https://3dprintstory.org> (accessed 04.09.2022).
2. 3DIY. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/raznovidnosti-kinematik-fdm-3d-printerov/> (accessed 05.09.2022).
3. Vektorus. Available at: <https://vektorus.ru/blog/usadka-pla-plastika-pri-pechati.html> (accessed 05.09.2022).

© Горшкалев Д. А., Амельченко Н. А., 2022

УДК: 629.7.064.5; 629.78.05; 89.25.21

## ИЗНАШИВАНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КОЛЕЦ ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Гришин\*, С. В. Павелко, В. Р. Сыпачев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: grishin\_aa@list.ru

*Рассмотрены процессы изнашивания и разрушения гальванического покрытия на основе золота токопроводящих колец в условиях сухого трения качения. Показано влияние изнашивания покрытия на величину электрического сопротивления токосъемных колец. Обоснован выбор структуры покрытия.*

*Ключевые слова: кольцевое токосъемное устройство, гальванические покрытия Cu-Ni-Au, изнашивание, электрическое сопротивление.*

## WEAR OF ELECTROPLATED COATING OF CONDUCTIVE RINGS OF CURRENT-COLLECTING DEVICES OF SPACECRAFT

A. A. Grishin\*, S. V. Pavelko, V. R. Sypachev

The Joint-stock Company Academician M. F. Reshetnev «Information Satellite Systems»  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation

\*E-mail: grishin\_aa@list.ru

*The processes of wear and destruction of gold-based electroplating of conductive rings under conditions of dry rolling friction are considered. The effect of coating wear on the value of the resistance of the current-removing rings is shown. The choice of the coating structure is justified.*

*Keywords: ring current collector, electroplating Si-Ni-Au, wear, electrical resistance.*

Полезная нагрузка и модуль служебных систем современных космических аппаратов (КА) потребляют до 15 кВт электрической мощности [1]. Ключевое место в СЭП КА занимают кольцевые токосъемные устройства (КТУ), обеспечивающие передачу электрической энергии от вращающихся СБ к стационарной бортовой системе и модулям полезной нагрузки. КТУ должны иметь низкую материалоемкость, высокий ресурс и позволять передавать значительную электрическую мощность с минимальными потерями при необходимом числе оборотов вращения вала устройства совместно с СБ [2–3]. Конструкция КТУ представляет собой набор слоев токосъемных колец (ТК). Каждый слой ТК состоит из трех основных элементов: подвижного внутреннего, неподвижного наружного и промежуточных упругих контактных колец. Принцип работы КТУ заключается в том, что контактные кольца сжаты с двух сторон поверхностями сопряженных с ними наружным и внутренним ТК и катятся по ним подобно шарикоподшипникам.

В течение всего жизненного цикла (изготовление, наземные испытания и эксплуатация) КТУ в составе КА ЭКСПРЕСС-АМ5, ЭКСПРЕСС-АМ6, ЭКСПРЕСС-АМ8 ТК совершают более  $1,1 \cdot 10^4$  оборотов при частоте вращения  $6,9 \dots 13,9 \cdot 10^4$  об/мин [4]. Перед разработчиками КТУ стоят актуальные задачи повышения их надежности, увеличения передаваемой электрической мощности с одновременным снижением потерь энергии (при передаче) и снижении материалоемкости. На данном этапе остро стоит вопрос сокращения потерь передаваемой энергии за счет снижения переходных сопротивлений в КТУ посредством повышения износостойкости гальванического покрытия ТК КТУ.

ТК, изготовленные из сплава бронзы, имеют гальваническое покрытие на основе золота. В процессе функционирования контактные кольца испытывают более  $7 \cdot 10^4$  циклов нагружения, что приво-

дит к износу покрытий и интенсивной деградации их электрических характеристик. В случае, когда покрытие является достаточно тонким, существенное влияние на характер и интенсивность износа также оказывают механические свойства подложки. Поэтому для повышения износостойки покрытий на основе золота используют твердые промежуточные слои между покрытием и подложкой [5]. Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению процессов изнашивания покрытий на основе золота, основное внимание в них уделяется исследованию влияния параметров осаждения покрытий на их трибологические характеристики. Однако для повышения износостойкости покрытий токосъемных колец в условиях циклической нагрузки в составе КТУ требуется детальное изучение процессов деформации и разрушения покрытий на разных этапах эксплуатации устройства с постоянным контролем целевой характеристики – сопротивления ТК. В данной работе представлены результаты исследований покрытий ТК различных конфигураций, прошедших длительные испытания в составе КТУ.

В производственной практике АО «ИСС» в качестве двух основных вариантов гальванических покрытий ТК распространены следующие схемы: МЗ.Н1-3.Зл-Н(98,5-99,5) (3 мкм меди, 1 мкм никеля, 3 мкм золота) и МЗ-18.Зл (3 мкм меди, 18 мкм золота). Принципиально данные схемы нанесения покрытия отличаются наличием, в первом случае, подслоя никеля толщиной 1 мкм.

Суть проведенной работы заключается в контроле сопротивления образцов ТК с различным покрытием, и изучение поверхности трения покрытий на различных этапах ресурсных испытаний КТУ, имитирующих функционирование по целевому назначению.

О состоянии гальванического покрытия возможно судить по величине сопротивления ТК или по величине падения напряжения, снятого со слоя ТК. Испытания проводились на прокруточном приспособлении, обеспечивающем скорость вращения внутреннего ТК относительно наружного с постоянной скоростью 0,1 об/мин. Через слой токосъемных колец пропускался постоянный ток силой 1 А, а величина падения напряжения непрерывно фиксировалась по видеографическому регистратору. Сопротивление покрытия вычисляется посредством закона Ома для участка цепи. Усредненная величина сопротивления слоя ТК составила  $5 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Поверхность трения и границы раздела покрытий изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 с микроанализатором Oxford Instruments X-MaxN 20, рис. 1.

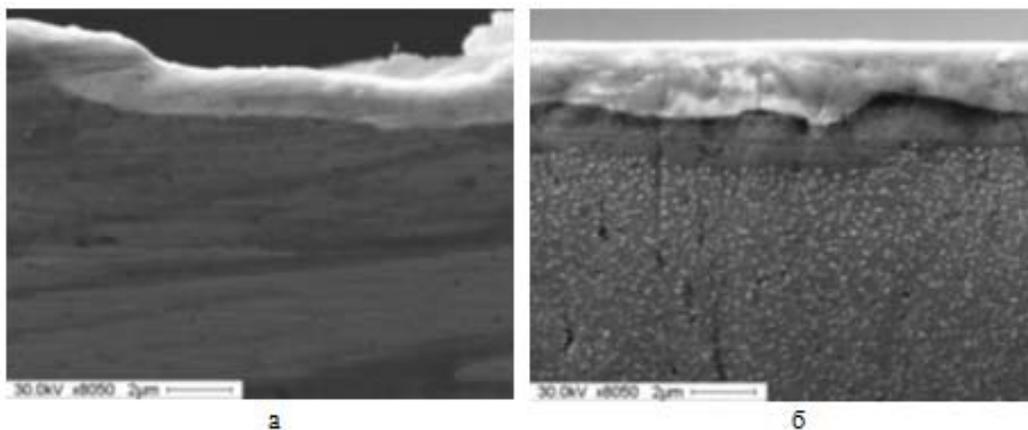


Рис. 1. Изображение границ раздела покрытий:  
а – ТК, хорошее по проводимости; б – ТК, плохое по проводимости

По результатам комплексных исследований изнашивания покрытия ТК установлено:

1. ТК с покрытием МЗ-18.Зл обладают меньшим электрическим сопротивлением. В среднем – на 16 %. Очевидно, что за счет большей толщины слоя золота и его последующей приработки сокращается переходное сопротивление между ТК.

2. ТК с покрытием МЗ.Н1-3.Зл-Н(98,5-99,5) выдерживают удвоенный ресурс в составе КТУ. У ТК с покрытием МЗ-18.Зл отмечены случаи деформации и отслоения золота от базового металла в середине цикла испытаний и стремительное увеличение сопротивления.

3. У колец с хорошей проводимостью гальваническое покрытие плотное, граница раздела плоская, без дефекта, как показано на рис. 1.а.

В качестве покрытия, обеспечивающего наименьшее сопротивление ТК, предпочтительна схема с большей толщиной слоя золота, однако в результате диффузионных процессов между медью и золотом развивается стремительное окисление рабочей поверхности колец и отслоение покрытия на этапе длительной наземной обработки. Перспективной схемой покрытия ТК является МЗ.Н1-3.Зл-Н(98,5-99,5), с возможным увеличением толщины наносимого золотого покрытия с последующим его уплотнением и полированием рабочей поверхности в целях снижения переходных сопротивлений.

#### Библиографические ссылки

1. Гришин А. А., Смирнов Н. А., Харитонов А. И. Анализ конструкции кольцевых токосъемных устройств // Вестник СибГАУ. 2014. № 5 (57). С. 146–153.
2. Актуальные проблемы совершенствования систем электропитания космических аппаратов / Косурина Т. А., Осокина О. А., Шамурин А. И. и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 3 (68). С. 66–69.
3. Гришин А. А., Струговец А. Г. Оценка конструкторских решений в части потерь на токосъемных устройствах при передаче электрической энергии от солнечных батарей // Труды МАИ : электронный журнал. URL: <http://trudymai.ru/>. Дата публикации: 25 декабря 2017. № 97.
4. Гришин А. А., Кудрявцев И. В. Обеспечение прочности контактных колец токосъемных устройств космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3 (102). С. 81–91.
5. Изнашивание гальванических покрытий на основе золота / Шугунов А. Р., Панин А. В., Лязгин А. О. и др. // Физическая мезомеханика. 2015. № 3 (18). С. 58–70.

#### References

1. 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.).
2. Kosurina T. A., Osokina O. A., Shamurin A. I., Shevchuk E. T. [Actual problems of improving spacecraft power supply systems]. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2012, No. 3, P. 66–69 (In Russ.).
3. 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).
4. Grishin A. A., Kudrjavcev I. V. [Ensuring the strength of contact rings of current-carrying devices of spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2018, No. 3, P. 81–91 (In Russ.).
5. Shugurov A. R., Panin A. V., Lyazgin A. O., Shesterikov E. V. [Wear of electroplated gold-based coatings] *Fizicheskaja mehanika*. 2015, No. 3, P. 58–70 (In Russ.).

© Гришин А. А., Павелко С. В., Сыпачев В. Р., 2022

УДК 67.05

## ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ПО ВНУТРЕННЕМУ ДИАМЕТРУ

В. В. Данькин<sup>1</sup>, А. С. Козырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Vdanykin@bk.ru

*Предложено специальное приспособление для базирования и закрепления заготовок по внутреннему диаметру. Рассмотрен принцип работы приспособления и проблемы, которые решаются при его использовании в машиностроении, в том числе космической отрасли.*

*Ключевые слова: разжимная цанга, базирование, пневмопривод.*

## A DEVICE FOR BASING AND FIXING WORKPIECES ALONG THE INNER DIAMETER

V. V. Danykin<sup>1</sup>, A. S. Kozyrev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University  
12a, Kirov Str. Zheleznogorsk, Krasoyarsk region, 662971, 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: Vdanykin@bk.ru

*A special device is proposed for basing and fixing workpieces along the inner diameter. The principle of operation of the device and the problems that are solved when using it in mechanical engineering, including the space industry, are considered*

*Keywords: expanding collet, basing, pneumatic drive.*

**Введение.** Космическая машиностроительная отрасль является достаточно своеобразной, она практически напрямую показывает уровень развития страны. Для космического машиностроения необходима точность расчётов, применение инновационных технологий, и ещё нужен в обязательном порядке особый подход к деятельности [1]. Без применения технологической оснастки в производстве обойтись практически невозможно. Причём это относится как к единичному, так и к серийному производству. Наиболее широко используемая разновидность оснастки – станочные приспособления [2]. Станочные приспособления – технологическая оснастка определенного вида, предназначенного для надежного закрепления и правильного базирования заготовки на станке с целью последующей механической обработки [3]. Основные их преимущества:

– базирование обрабатываемых деталей на станках производится без выверки, что ускоряет процесс базирования и обеспечивает возможность автоматического получения размеров на настроенных станках;

– повышается производительность и обеспечиваются условия труда рабочих за счёт применения многоместной, многопозиционной и непрерывной обработки;

– расширяются технологические возможности станков [4-5].

Приспособление «Оправка разжимная», схема которого приведена на рис. 1, предназначено для базирования и закрепления заготовки по внутреннему диаметру. Приспособление состоит из базовой части и сменных установочных элементов. Сменными элементами является цанга. Базовая часть состоит из штока, цанги и задней бабки с пневмоприводом. Принцип работы приспособления: при подаче сжатого воздуха задняя бабка начинает давить, тем самым перемещая шток влево, шток давит на цангу, лепестки цанги расходятся в радиальном направлении и происходит зажим заготовки. При подаче сжатого воздуха в поршневую полость задняя бабка перемещается вправо, тем самым перестает давить на шток, шток за счет тарельчатой пружины возвращаются в начальное состояние и заготовка

раскрепляется. Данное приспособление позволяет закреплять заготовки различной конфигурации, различных размеров за счет сменных установочных элементов.

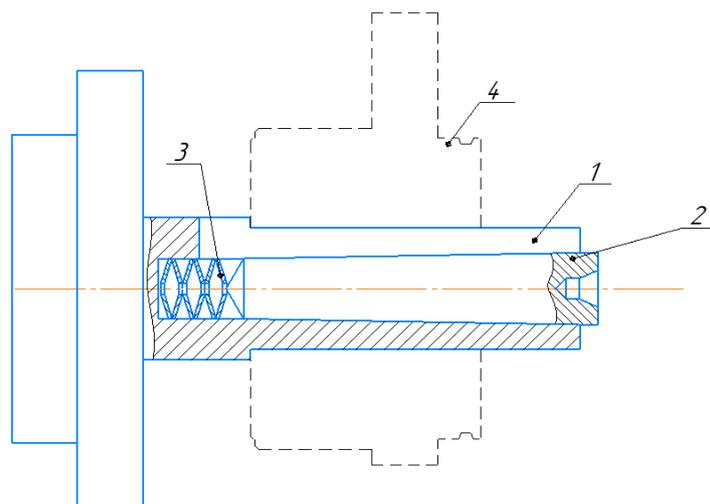


Рис. 1. схема приспособления  
1 – цапга; 2- шток; 3 – пакет тарельчатых пружин; 4 –заготовка.

Также из преимуществ стоит выделить то, что заготовка доступна для обработки за один установ, чего нельзя достичь при обработке в трёхкулачковом патроне, и это существенно сокращает время обработки. Преимуществами перед установкой заготовки в центрах является то, что не нужно использовать различные хомуты для передачи крутящего момента и не нужно делать специальные центровые отверстия, усложняющие и ограничивающие в некоторых случаях технологический процесс создания детали.

### Библиографические ссылки

1. Космическое машиностроение [Электронный ресурс]. URL: [https://spravochnikvs.com/kosmicheskoe\\_mashinostroenie?ysclid=17x7mmmedu846743041](https://spravochnikvs.com/kosmicheskoe_mashinostroenie?ysclid=17x7mmmedu846743041) (Дата обращения: 03.09.2022).
2. Проектирование и расчёт станочных и контрольно-измерительных приспособлений в курсовых и дипломных проектах: учеб. Пособие/ И.Н. Аверьянов, А.Н. Болотеин, М.А.Прокофьев; - Рыбинск: РГАТА, 2010. – 220 с. ил.
3. Станочные приспособления: классификация, проектирование, расчет [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17148/?ysclid=17x6mwlpzw624532404> (Дата обращения: 14.04.2022).
4. Технологическая оснастка [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=554685> (Дата обращения: 14.04.2022).
5. Разработка станочного приспособления [Электронный ресурс]. URL: [https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00193495\\_0.html?ysclid=17x5oim9tz646586837](https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00193495_0.html?ysclid=17x5oim9tz646586837) (Дата обращения: 15.04.2022).

### References

1. Kosmicheskoe mashinostroenie. Available at: [https://spravochnikvs.com/kosmicheskoe\\_mashinostroenie?ysclid=17x7mmmedu846743041](https://spravochnikvs.com/kosmicheskoe_mashinostroenie?ysclid=17x7mmmedu846743041) (accessed: 03.09.2022).
2. Proektirovanie i raschyot stanochnyh i kontrol'no-izmeritel'nyh prispособlenij v kursovyh i diplomnyh proektah: ucheb. Posobie/ I.N. Aver'yanov, A.N. Bolotein, M.A.Prokof'ev; - Rybinsk: RGATA, 2010. – 220 s. il.
3. Stanochnye prispособleniya: klassifikaciya, proektirovanie, raschet. Available at: <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17148/?ysclid=17x6mwlpzw624532404> (accessed: 14.04.2022).
4. Tekhnologicheskaya osnastka. Available at: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=554685> (accessed: 14.04.2022).
5. Razrabotka stanochnogo prispособleniya. Available at: [https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00193495\\_0.html?ysclid=17x5oim9tz646586837](https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00193495_0.html?ysclid=17x5oim9tz646586837) accessed: 15.04.2022).

УДК. 621.941.1

## СХЕМЫ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ

А. П. Деткина, А. И. Кругленя, А. В. Сутягин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: 18-nastyia-08@mail.ru

*Представлены геометрические схемы ротационного точения. Сделан вывод о целесообразности использования первой схемы установки с прямой схемой резания, для ротационного точения принудительно вращаемым многолезвийным инструментом.*

*Ключевые слова: ротационное точение, режущий инструмент, традиционное точение.*

## ROTARY TURNING SCHEMES

A. P. Detkina, A. I. Kruglenya, A. V. Sutyagin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: 18-nastyia-08@mail.ru

*Geometric schemes of rotary turning are presented. The conclusion is made about the expediency of using the first installation scheme with a direct cutting scheme for rotary turning with a forcibly rotated multi-blade tool.*

*Keywords: rotary turning, availability of tools, obsolete turning.*

В промышленности находят применение различные схемы обработки металлов резанием. Одной из таких схем является схема ротационного точения, в основе которой лежит обработка материала сборным многолезвийным инструментом, лезвия которого совершают при обработке вращательное касательное движение.

Ротационное точение высокопроизводительный метод обработки материалов [1]. Предполагает перемещение режущего многолезвийного инструмента в касательном направлении, вдоль обрабатываемой поверхности, а также вращение вокруг своей оси. Таким образом, в процессе ротационного точения происходит непрерывная смена контактных поверхностей инструмента и обрабатываемой детали. Активный участок режущего лезвия непрерывно обновляется, периодически участвуя в процессе снятия стружки. При периодической смене активного участка режущего лезвия инструмента улучшаются условия работы инструмента, теплоотвод из зоны резания, снижаются усилия резания. Практические задачи по реализации технологий ротационного точения для различных производственных целей основываются нами на комплексе теоретических и экспериментальных исследований по работе ротационными инструментами

Ротационное точение имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным точением:

- низкая шероховатость обработанной поверхности ( $Ra\ 0,2\ \mu\text{m}$ );
- высокая производительность в 4-6 раз (за счет увеличения подачи, стойкости ротационных многолезвийных инструментов и низкой температуры резания);
- высокая стойкость инструмента, которая достигается снижением температуры резания, небольшим линейным износом, который не накапливается, как в обычном инструменте, на одном неподвижном участке лезвия, а равномерно распределяется по всей длине лезвия, хорошими условиями теплоотвода от работающих участков лезвия, уменьшением сил трения между рабочими поверхностями инструмента и обрабатываемым материалом (стойкость ротационного инструмента в десятки раз выше по сравнению с традиционным инструментом);

- температура в зоне резания при обработке ротационным инструментом по сравнению с традиционным снижается до 40%, благодаря, большей длине режущей кромки лезвия, непрерывному вращению ее во время работы, хорошим условиям охлаждения лезвия за время холостого пробега;

- микрорельеф обработанной поверхности с округленными вершинами и впадинами микронеровностей и большей в 1,2-1,3 раза, по сравнению с обработкой обычным режущим инструментом, относительной опорной длиной профиля поверхности, что способствует повышению износостойкости;

- возможность работы при отсутствии СОТС, для заготовок из стали и чугуна;

- высокая длительная точность и стабильность процесса.

Ротационное точение также имеет некоторые недостатки:

- сложная технология изготовления инструмента, по сравнению с обычным токарным инструментом;

- невозможно обрабатывать внутренние поверхности;

Схема ротационного точения это установка положения инструмента относительно заготовки. Различают две геометрические схемы ротационного точения, отличающиеся функциями, которые выполняют торец и боковая поверхность режущего элемента. Каждая геометрическая схема может быть реализована с двумя различными направлениями угла поворота оси режущего элемента.

Существует 4 варианта схем ротационного точения. А также еще две схемы с нулевым углом поворота. Схемы представлены на рис. 1.

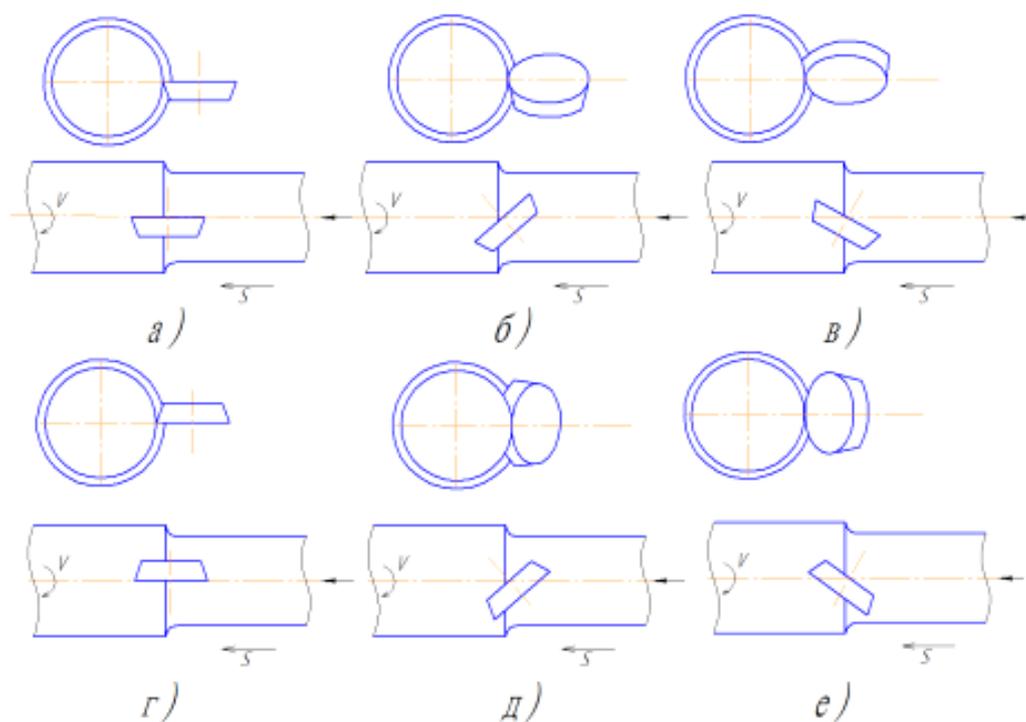


Рис. 1. Схемы ротационного точения

а), б), в) первая геометрическая схема; г), д), е) вторая геометрическая схема; а), г) торцовая плоскость и вершина резца располагаются на уровне оси центров станка; б), д) наклон оси инструмента против часовой стрелки (прямая); в), е) наклон оси инструмента по часовой стрелке (обратная)

При первой геометрической схеме торец инструмента выполняет функции передней поверхности, а боковая часть – соответственно задней поверхности лезвия инструмента, на рис. 1 а, б, в показаны варианты установки ротационного инструмента по первой геометрической схеме. При установке по схеме, представленной на рис. 1 а, торцовая плоскость и вершина резца соответственно располагаются на уровне оси центров станка [2].

В зависимости от направления поворота различают прямую и обратную схемы установки ротационного инструмента. При обратной схеме установки наклон оси инструмента осуществляется по часовой стрелке (рис. 1 в), при прямой схеме установки наклон оси осуществляется против часовой стрелки (рис. 1, б). Недостаток, заключается в том, что угол режущего клина при обратной схеме

приходится выполнять меньшим, чем при прямой схеме, возможна потеря прочности режущего клина. Прямая схема, как это следует из анализа обратной схемы, является более оптимальной.

Рассмотрим вторую геометрическую схему ротационного резания (рис. 1, г, д, е). Функции передней поверхности выполняют при этом боковая поверхность инструмента, а функции задней – торец инструмента. Вершина резца располагается на уровне линии центров станка. Часть режущей кромки находится при этом выше линии центров. Как и для первой геометрической схемы ротационного резания, для второй схемы также имеет место прямая (рис. 1, д) и обратная (рис. 1, е) схемы установки. Резание в этом случае весьма затруднительно. Форма режущего клина такова, что клин работает больше на изгиб, передний угол получается отрицательным.

При первой геометрической схеме, вероятно, применять многоступенчатость (к примеру, ставить несколько режущих чашек на одну ось), для большей эффективности рекомендуется использовать многолезвийный принудительно вращаемый инструмент. При второй же схеме, этого сделать не получится, и в инструменте может быть лишь один режущий элемент.

При ротационном точении использование первой схемы установки с прямой схемой резания, по сравнению с другими комбинациями, дает ощутимые преимущества. Поэтому выбор именно этой схемы является более логичным [3].

### Библиографические ссылки

1. Технология ротационного точения винтовой поверхности деталей машин принудительно вращаемым многолезвийным инструментом : монография / И.В. Трифанов, Л.С. Малько, А.В. Сутягин // Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 116.
2. Пат. 100933 RU, МПК В 23 В 1/00. Устройство для ротационного точения / Мкртчян А. Ф., Музафаров Р.С., Кузьмин С.В. № 2010122099/02 ; заявл. 31.05.2010 ; опубл. 10.01.2011. 5 с.
3. Малько Л.С. Ротационное точение винтовой поверхности крупногабаритных деталей/ Л.С. Малько // СТИН. 2007. №11, С.39-40.

### References

1. Trifanov I.V., Malko L.S., Sutyagin A.V. [Technology of rotational turning of the helical surface of machine parts with a forcedly rotated multi-edge tool: monograph]. Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk., 2013, 116 p.
2. Mkrтчyan A.F., Muzafarov R.S., Kuzmin S.V. Device for rotary turning. Patent RF, no. 100933, 2010.
3. Malko L.S. Rotary turning of the helical surface of large parts / L.S. Malko // STIN. 2007. No. 11, p. 39-40.

© Деткина А. П. Кругленя А. И., Сутягин А. В., 2022

УДК 621.9

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А. А. Жигарева, А. И. Евстифейкин, 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: zhigareva\_1870@mail.ru

*Представлены теоретические и экспериментальные зависимости качества поверхностного слоя деталей от режимов обработки при точении.*

*Ключевые слова: шероховатость, обработка резанием, нарост, точение.*

## EVALUATION OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE PART SURFACE LAYER AFTER MACHINING

A. A. Zhigareva, A. I. Evstifeykin, E. V. Ramenskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: zhigareva\_1870@mail.ru

*Theoretical and experimental dependences of the part surface layer quality on the turning processing modes are presented.*

*Keywords: roughness, cutting, growth, turning.*

Обработка резанием обладает малой энергоемкостью и высокой производительностью и является универсальным методом размерной обработки и поэтому занимает большое место в машиностроении. Шероховатость и волнистость поверхности оказывают значительное влияние на такие важные эксплуатационные свойства деталей ракетно-космической техники как износостойкость, усталостная прочность, антикоррозионная стойкость, стабильность посадок, герметичность соединений [1-2].

Микронеровности оказывают большое влияние на стабильность подвижных и неподвижных посадок. В результате износа трущихся поверхностей возможно изменение посадок. Это может произойти не только в течении длительной эксплуатации, но и в период приработки деталей, когда происходит особенно интенсивный износ и деформирование микронеровностей [2-4]. Повышение эффективности обработки заданного уровня качества может быть достигнуто за счет выбора рациональных методов обработки деталей, которые обеспечивают максимальную производительность и трудоемкость.

Аналитически величину шероховатости можно вычислить по формуле [3]:

$$Rz = \frac{S^2}{8r},$$

где  $S$  – продольная подача, мм/об;  $r$  – радиус при вершине резца, мм.

Показатель шероховатости  $Rz$  в зависимости от  $Ra$  определяют соотношением  $Rz \approx 4Ra$ , при  $Rz \geq 8$  мкм или  $Rz \approx 5Ra$  при  $Rz < 8$  мкм.

Формула расчета шероховатости от скорости имеет вид [5]:

$$Ra = 0,85 \frac{t^{0,31} S^{0,58} \varphi^{0,4} \varphi_1^{0,4}}{V^{0,06} r^{0,65} HB^{0,05}},$$

где  $t$  – глубина резания, мм;  $\varphi$  – главный угол плане, °;  $\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане, °;  $V$  – скорость резания, м/мин.

Для определения параметров качества поверхностного слоя детали проводились эксперименты на токарно-винторезном станке 1М63 с использованием заготовок диаметром 80 мм из конструкционной легированной стали марки 40X и нержавеющей стали 12X18H10T.

Сталь 40X обрабатывалась чистовым проходным резцом с пластиной из твердосплавного материала Т15К6, геометрические параметры резца: главный угол в плане  $\varphi=95^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi_1=5^\circ$ , радиус при вершине резца  $r = 0,8$  мм. Резание стали 12X18H10T проводилось резцом с пластиной из твердосплавного материала ВК8, геометрические параметры резца:  $\varphi=90^\circ$ ,  $\varphi_1=10^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм, сопровождалось СОЖ.

Измерение параметра шероховатости осуществлялось профилометром TR100 с диапазоном измерения  $Ra$  0,05...10,0 мкм,  $Rz$  0,1...50 мкм, погрешность измерений  $\pm 15\%$ .

В результате исследования получены зависимости величины шероховатости  $Ra$  от скорости резания  $V$  и представлены на рис. 1 графики сравнения шероховатости теоретических и экспериментальных данных для стали 40X и 12X18H10T.

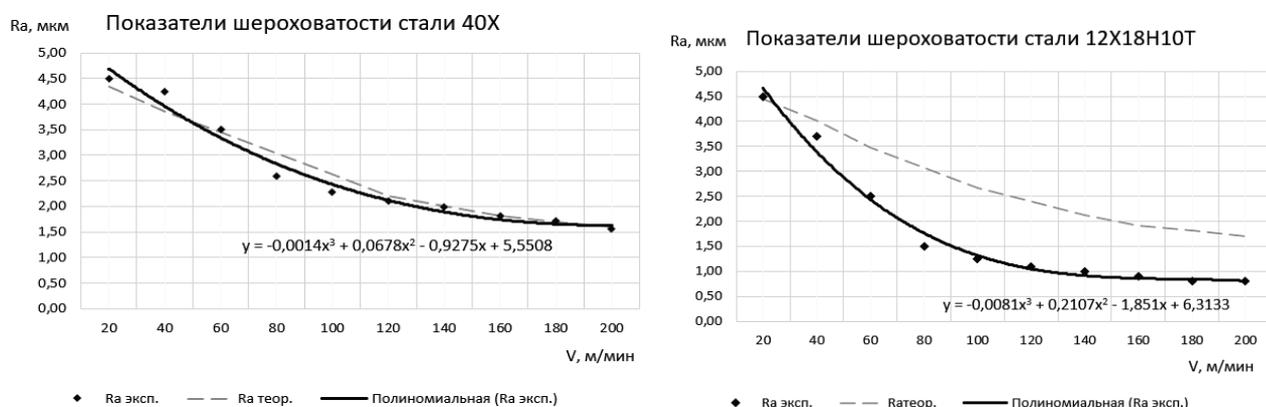


Рис. 1. Зависимости шероховатости от скорости резания

Анализ графиков расчетных значений, показал, что имеется зависимость, приближенная к линейной. На графиках, полученных экспериментальным путем, выделяются характерные зоны. Так для стали 40X в диапазоне скоростей 20-80 м/мин заметно влияние нароста на показатель  $Ra$ , далее с увеличением скорости наблюдается снижение шероховатости и стабилизация ее значения. После увеличения скорости от 120 м/мин экспериментальные значения приближаются к расчетным. Для стали 12X18H10T с увеличением скорости обработки наблюдается резкое уменьшение шероховатости, однако при переходе порога в 80 м/мин шероховатость меняется не значительно.

В следующем эксперименте проведено исследование шероховатости  $Ra$  от подачи  $S$ , результат представлен на рис. 2. Исходя из экспериментальных данных для стали 40X заметно наиболее резко возрастание шероховатости после увеличения подачи от 0,25 мм/об.

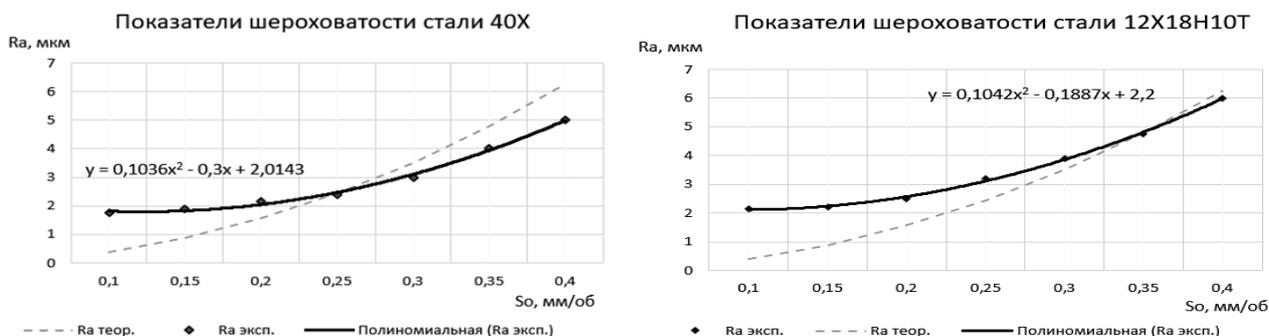


Рис. 2. Зависимости шероховатости от подачи

Для нержавеющей стали 12Х18Н10Т наиболее интенсивное возрастание шероховатости происходит при подаче более 0,2 мм/об, при этом экспериментальные и теоретические зависимости совпадают на участке в диапазоне подач от 0,35 мм/об.

Расхождение экспериментальных и теоретических данных по шероховатости в скоростном диапазоне от 20 до 200 м/мин для стали 40Х не превышает 12%, а для стали 12Х18Н10Т составляет более 30%.

Таким образом при теоретических расчетах для оценки параметров качества поверхностного слоя детали полученного после механической обработки нержавеющей стали потребуется использование поправочных коэффициентов.

### Библиографические ссылки

1. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т.1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова; М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
2. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. Введ. 1982-07-01. М.: Издательство стандартов, 1988. 14 с.
3. Влияние режимов резания и геометрии инструмента на шероховатость [Электронный ресурс] URL: <https://helpiks.org/6-82839.html> (дата обращения: 01.09.2022).
4. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова; Иван. гос. хим. технол. ун-т. Иваново, 2009. 64 с.
5. Как рассчитать шероховатость деталей при обработке инструментами [Электронный ресурс] URL: <https://www.axissteel.ru/rasschitat-sherohovatos/> (дата обращения: 01.09.2022).

### References

1. Spravochnik tehnologa mashinostroitelja. V 2 t. T.1 / pod red. A. G. Kosilovoj, R. K. Meshherjakova; M.: Mashinostroenie, 1986. 656 p. (In Russ.)
2. GOST 24773-81. Poverhnosti s reguljarnym mikrorel'efom. Klassifikacija, parametry i harakteristiki. Vved. 1982-07-01. M.: Izdatel'stvo standartov, 1988. 14 p. (In Russ.)
3. Vlijanie rezhimov rezanija i geometrii instrumenta na sherohovatos' Available at: <https://helpiks.org/6-82839.html> (accessed 01.09.2022).
4. Stepanova, T. Ju. Tehnologii poverhnostnogo uprochnenija detalej mashin: uchebnoe posobie / T. Ju. Stepanova; Ivan. gos. him. tehnol. un-t. Ivanovo, 2009. 64 p. (In Russ.)
5. Kak rasschitat' sherohovatos' detalej pri obrabotke instrumentami Available at: <https://www.axissteel.ru/rasschitat-sherohovatos/> (accessed 01.09.2022).

© Жигарева А. А., Евстифеев А. И., Раменская Е. В., 2022

УДК 621.923

**АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ЛАТУННОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ 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

*Выполнен анализ полученных значений шероховатости внутренней поверхности, до и после обработки абразивным потоком прямоугольных заготовок. Установлено существенное уменьшение шероховатости и упрочнение поверхности исследуемого образца из латуни ЛС59.*

*Ключевые слова: латунь, заготовка прямоугольного сечения, обработка абразивным потоком, шероховатость, микротвердость.*

**ANALYSIS OF THE ROUGHNESS AND MICROHARDNESS  
OF THE INNER SURFACE OF A BRASS RECTANGULAR WORKPIECE 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

*The analysis of the obtained values of the roughness of the inner surface, before and after abrasive flow machining of rectangular workpieces, is carried out. A clear decrease in roughness and hardening of the profile of the investigated sample made of brass LS59 was found.*

*Keywords: brass, rectangular workpiece, abrasive flow machining, roughness, microhardness.*

**Введение.** Сравнительный анализ методов финишной обработки внутренних каналов показал применимость обработки абразивным потоком (ОАП) для улучшения качества поверхности трубных заготовок прямоугольного поперечного сечения [1].

При обработке абразивным потоком этот поток полностью копирует форму поперечного сечения по всей длине обрабатываемого канала, а также обладает такими вязкоупругими свойствами, которые обеспечивают оптимальное сочетание скорости потока и его давления на внутреннюю стенку канала [2].

**Шероховатость и микротвердость поверхности до и после обработки.** Исследования процесса обработки абразивным потоком (абразивно-экструзионной обработки) внутренней поверхности прямоугольных заготовок из латунного сплава ЛС59 показали, что шероховатость изменила не только свою величину от  $Ra = 1,3 \dots 1,8$  мкм до  $Ra = 0,16 \dots 0,25$  мкм, но и направление. Это направление стало параллельным потоку рабочей среды, а структура поверхности стала однородной и представлена комплексом рисок шириной  $1 \dots 10$  мкм и протяженностью порядка 100 мкм [3].

В продолжении данного исследования нами проведен более детальный анализ шероховатости и микротвердости внутренней поверхности экспериментального образца до и после обработки абразивным потоком. Для этого с помощью профилометра модели MarSurf M300 получены профилограммы поверхности до (рис. 1) и после обработки (рис. 2). Параметры микрогеометрии внутренней поверхности образца до и после ОАП приведены в табл. 1.

Сравнение двух профилограмм наглядно показывает, что после обработки абразивным потоком существенно улучшились не только такие показатели шероховатости как  $Ra$ ,  $Rz$ , и  $Rmax$ , но и  $Rpm$  и  $Rv$ .

Для анализа изменения микротвердости поверхности образца использован метод измерения твёрдости металлов и сплавов по Виккерсу. Измерения проведены при нагрузке 100 г и 20 г. Установлено, что микротвердость поверхности образца до обработки была 110 HV, а после ОАП увеличилась до 190 HV.

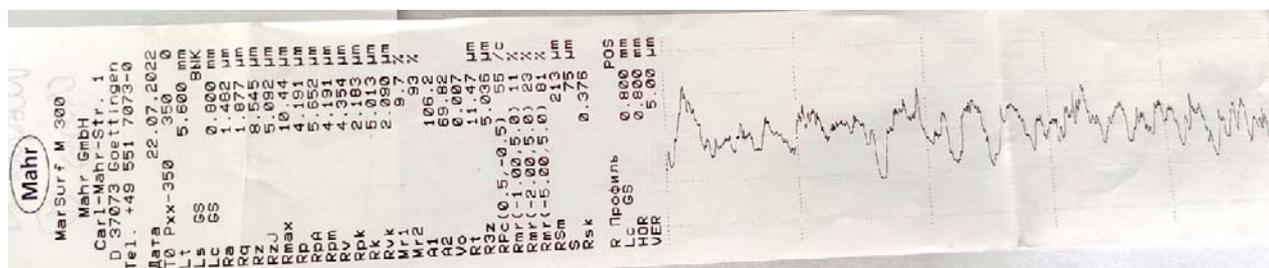


Рис. 1. Профилограмма необработанной поверхности

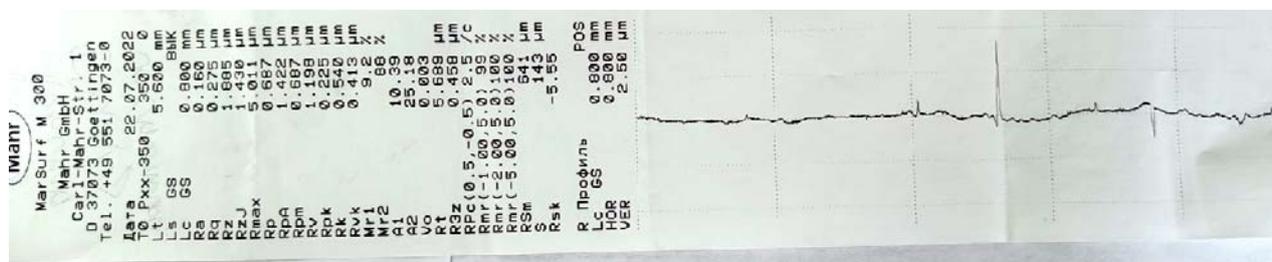


Рис. 2. Профилограмма обработанной поверхности

**Параметры микрогеометрии внутренней поверхности образца**

Наименование параметров шероховатости	Численное значение параметров	
	до ОАП	после ОАП
Средняя арифметическая шероховатость, $Ra$ , мкм	1,482	0,16
Среднеквадратическая шероховатость, $Rq$ , мкм	1,877	0,275
Средняя высота неровности, $Rz$ , мкм	8,545	1,885
Максимальная высота шероховатости, $Rmax$ , мкм	10,44	5,011
Средняя высота выступов профиля, $Rpm$ , мкм	4,191	0,687
Средняя глубина впадин профиля, $Rv$ , мкм	4,354	1,198
Материальная составляющая, определяется для линии разреза, которая отделяет выступающие пики от основного профиля шероховатости; $Mr1$ , %	9,7	9,2
Материальная составляющая, определяется для линии разреза, которая отделяет глубокие впадины от основного профиля шероховатости; $Mr2$ , %	93	88

Изменение величины и направления шероховатости поверхности латунного образца с одновременным ее упрочнением объясняется тем, что при обработке абразивным потоком реализуется несколько видов контактных взаимодействий. На уровне контакта микронеровностей поверхности с микровыступами зерна рабочей среды реализуется процесс пластического оттеснения и микрорезания. На уровне контакта микронеровностей поверхности с зерном в целом характерны упругая и пластическая деформации. Пластическая деформация ведет к деформационному упрочнению приповерхностной области и появлению остаточных сжимающих напряжений.

**Выводы.** Анализ шероховатости и микротвердости внутренней поверхности латунной прямоугольной заготовки до и после ОАП показал, что обработка абразивным потоком обеспечила не только изменение направления и величины шероховатости поверхности от  $Ra = 1,3...1,8$  мкм до  $Ra = 0,16...0,25$  мкм, но и увеличение микротвердости поверхности от 110 HV до 190 HV.

Результаты анализа показали, что с учетом рекомендаций по выбору вида и величины зерна наполнителя [4] обработку абразивным потоком можно применять для отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей латунных прямоугольных заготовок.

#### Библиографические ссылки

1. Иванов П.А. Особенности существующих методов финишной обработки внутренних каналов / Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : материалы VII Межд. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (12-16 апреля 2021 г.) В 3 т. Т. 1. С. 30-32.

2. Иванов П.А., Левко В.А. Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения // *Металлообработка*. 2021. № 4. С. 11–19.

3. Левко, В. А. Научные основы абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко. Красноярск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2015. 222 с.

4. Иванов П.А., Левко В.А. // Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2022. Т. 25. № 2. С. 6-13.

#### References

1. Ivanov P.A. Analysis of the probability caricature the surface of channels non-circular cross section processing abrasive flow machining / *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2021. V. 1. p. 30-32. (in Russ).

2. Ivanov P.A., Levko V.A. Prospects of abrasive flow machining of the inner surface of bended tubular parts of rectangular section // *Metalworking*. 2021. No 4. p. 11-19. (in Russ).

3. Levko V. A. Scientific bases of abrasive flow machining of parts. [Federal State Budgetary Educational Institute of Higher Education „Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev“] Krasnoyarsk, 2015, p. 222. (in Russ).

4. Ivanov P.A., Levko V.A. Type and size filler grain selection during abrasive flow machining on non-ferrous alloys rectangular parts // *Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov*. 2022. Vol. 25. No. 2. pp. 6-13.

© Иванов П. А., Левко В. А., 2022

УДК 621.9.048.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

А. П. Исаев\*, Д. А. Горшкалев, В. А. Сороковиков, В. А. Осипова, 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: andrewjusto@mail.ru

*В рамках работы рассмотрены наиболее распространенные марки и важные критерии электрод-инструментов, влияющие на их износ причины, а также возможные пути снижения износа.*

*Ключевые слова: износ, инструмент, электроэрозионная обработка.*

## TOOL WEAR RESEARCH AT ELECTRIC DISCHARGE MACHINING

A. P. Isaev\*, D. A. Gorshkalev, V. A. Sorokovikov, V. A. Osipova, L. V. Zverintseva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: andrewjusto@mail.ru

*This work considers the most spread grades and important criteria of electrode tools, factors influencing their wear, and possible ways to decrease the wear.*

*Keywords: wear, tool, electric discharge machining.*

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) находит широкое применение в машиностроении, позволяя получить сложные поверхности с высокой точностью. В основе ЭЭО лежит эффект расплавления и испарения частиц материала под воздействием электрических импульсов. Электрическая энергия выделяется в канале разряда между обрабатываемой поверхностью и погруженным в жидкую (неэлектропроводящую) среду электродом-инструментом (ЭИ). Импульсные разряды, следующие один за другим, производят выплавление и испарение частиц материала. В связи с развивающимся в канале разряда давлением, данные частицы выбрасываются из зоны обработки, и ЭИ постепенно внедряется в обрабатываемую поверхность.

Неизбежным результатом действия импульса тока является расплавление не только обрабатываемого материала, но и материала электрода-инструмента. Целью данной работы является исследование износа ЭИ при обработке на электроэрозионном станке в зависимости от материала электрода-инструмента и режимов обработки.

Одной из важных характеристик, которой должны обладать электрод-инструменты, является эрозионная устойчивость, поскольку при ЭЭО происходит разрушение и заготовки детали, и самого электрода. Существенное влияние на износ электрода-инструмента оказывает скорость прокачки жидкости. Так, у медно-графитовых ЭИ с уменьшением скорости прокачки жидкости износ повышается, у медных ЭИ – снижается.

Выбор марки электрода-инструмента осуществляется в соответствии с обрабатываемым им материалом.

Для сварки низколегированных и низкоуглеродистых сталей используют электрод-инструменты марки АНО, УОНИ и ТМУ, высоколегированной стали – ОЗЛ, АНЖР, чугуна – ЦЧ и МНЧ [1]. Характеристики данных марок электродов представлены в таблице 1.

Одним из путей снижения износа электрода-инструмента является использование материалов, имеющих наибольшую эрозионную стойкость. Перечень известных материалов, применяемых для

изготовления ЭИ, в порядке возрастания их эрозионной стойкости выглядит так: алюминий и его сплавы, серый чугун, латунь, медь, вольфрам, графитированные материалы.

Таблица 1

### Характеристики электродов-инструментов

Марка электродов	Коэффициент наплавки, г/А·ч	Производительность наплавки, кг/ч	Расход электродов на 1 кг наплавленного металла, кг	Изготавливаемый диапазон диаметров, мм
УОНИ 13/45	9,5	1,3 (для Ø 3 мм)	1,6	2...5
ОЗЛ-6	11,5	1,5 (для Ø 4 мм)	1,6	
АНО-4	8,3	1,4 (для Ø 4 мм)	1,7	3...5
ЦЧ-4	10	1,1 (для Ø 4 мм)	1,8	
АНЖР-3У	14	1,5 (для Ø 4 мм)	1,7	
T-590	9	1,9 (для Ø 4 мм)	1,4	4...5

Важнейшим параметром, от которого зависит износ электрода-инструмента, является материал, из которого он изготовлен. ЭИ должен изготавливаться из эрозионно-стойкого материала, обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов ЭЭО. Производительность и качество электроэрозионной обработки находятся в зависимости от материала ЭИ [2].

Решением, позволяющим уменьшить износ электрода, является применение iQ-технологии, позволяющей уменьшить число импульсов при обработке. В начале процесса необходимо создать узкий поток плазмы при очень высокой плотности тока, а положительному электроду – иметь большой заряд. Таким образом, эффективность каждого импульса будет увеличена без уменьшения скорости обработки. Технология нашла свое применение на графитовых и медных электродах [4]. В таблице 2 приведены основные характеристики с использованием различных технологий ЭЭО при выжигании одного отверстия в инструментальной стали 4X5МФС.

Таблица 2

### Электроэрозионная обработка с использованием графитного электрод-инструмента

Технология ЭЭО	Количество отверстий, мм	Глубина отверстия, мм	Время черновых и чистовых режимов, ч	Износ на черновых и чистовых режимах, мм	Число необходимых электродов, шт.
Обычная	1	12	0,767 / 0,867	0,2 / 0,06	2
iQ			1,1 / 1,45	0,05 / 0,001	1
Обычная	4		3,067 / 3,467	0,2 / 0,06	5
iQ			3,4 / 5,8	0,05 / 0,01	4

Согласно данным из таблицы 2, электроэрозионная обработка по iQ-технологии для одиночного и группы отверстий требует меньшее количество электродов в связи с их пониженным износом по сравнению с обычной технологией, но при этом необходимо больше времени на прожиг отверстий.

Другим решением проблемы износа электродов-инструментов может являться создание условий, при которых износ компенсируется слоем углерода, осаждающимся на рабочей поверхности инструмента в результате разложения углеродосодержащих рабочих жидкостей. Износ практически полностью прекратится, если установить равновесие между удаляемым за счет эрозии и осаждающимся на поверхность ЭИ материалом, что возможно достичь, сформировав особую форму импульсов. Для этого импульсам придают крутой передний фронт с большой амплитудой напряжения для обеспечения разряда. После разряда напряжение снижают на протяжении времени, необходимого для разложения рабочей среды и осаждения графита. Таким образом, удается устранить или минимизировать износ ЭИ, сохранив достаточно высокую производительность процесса ЭЭО. Например, у электрода-инструмента из меди, покрываемой слоем графита, износ уменьшается в десятки раз по сравнению с простым медным ЭИ [3].

Таким образом, износ ЭИ зависит от формы и энергии импульсов электрического тока, причем для различных материалов форма импульсов, обеспечивающая минимальный износ, различна.

### Библиографические ссылки

1. Марки электродов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.svarbi.ru/articles/markirovka-elektrodov-vsye-cto-vam-nuzhno-znat/> (дата обращения 16.9.2022).
2. Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Исследование износа электрод-инструмента при копировально-прошивной электроэрозионной обработке биметаллов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1.
3. Чернышёв К.А. Пути снижения износа электрода-инструмента при электроэрозионной обработке // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 233.
4. Научный журнал «Металлообработка и станкостроение» [Электронный ресурс]. URL: <https://booktech.ru/journals/metalloobrabotka-i-stankostroenie/1021-metalloobrabotka-i-stankostroenie-2011-09.html> (дата обращения 18.9.2022).

### References

1. Electrode grades. Available at: <https://www.svarbi.ru/articles/markirovka-elektrodov-vsye-cto-vam-nuzhno-znat/> (accessed 16.9.2022).
2. Shlykov E.S., Ablyaz T.R. Research of electrode-tool wear during sinker electrical discharge machining of bimetals // Modern Problems of Science and Education. 2015. no. 2-1.
3. Chernyshev K.A. Ways to reduce the wear of the tool electrode during electric erosion processing // Advances in Modern Natural Science. 2011. no. 7. P. 233.
4. Science journal «Metallworking and machine tool industry». Available at: <https://booktech.ru/journals/metalloobrabotka-i-stankostroenie/1021-metalloobrabotka-i-stankostroenie-2011-09.html> (accessed 18.9.2022).

© Исаев А. П., Горшкалев Д. А., Сороковиков В. А.,  
Осипова В. А., Зверинцева Л. В., 2022

УДК 621.923

## ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В. А. Левко\*, Н. С. Теряев

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

*Проведен сравнительный анализ финишных технологий обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей. Установлено, что технология обработки абразивным потоком позволяет получить требуемую величину шероховатости внутренней поверхности каналов в заготовках. Рекомендовано применение данной технологии для финишной обработки сложнопрофильных литых деталей из труднообрабатываемых материалов.*

*Ключевые слова: сложнопрофильная деталь, обработка абразивным потоком.*

## TECHNOLOGIES OF FINISHING OF CLOSED CHANNELS OF COMPLEX PROFILE PARTS

V. A. Levko\*, N. S. Teryaev

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

*A comparative analysis of finishing technologies for processing closed channels of complex-profile parts has been carried out. It has been established that the technology abrasive flow machining makes it possible to obtain the required value of the roughness of the inner surface of the channels in the workpieces. It is recommended to use this technology for finishing processing of complex-profile cast parts from hard-to-machine materials.*

*Keywords: complex profile part, abrasive flow machining.*

**Введение.** Известно, что корпусные детали турбонасосного агрегата работают при высоких и средних статических и динамических нагрузках, поэтому для их изготовления используют литейные коррозионностойкие стали 03X11H8M2ФЛ, 03X12H10MTЮЛ, 04X12H6M5КЮЛ, 08X14H7МЛ ( $\sigma_s > 800$  МПа). Качество поверхности деталей после литья по выплавляемым моделям характеризуется: повышенной шероховатостью  $Ra = 20...40$  мкм; большой глубиной термически измененного слоя (литейная корка  $h = 0,1...0,8$  мм); высокими остаточными напряжениями. Анализ конструкций деталей со сложными каналами показал, что: каналы расположены по окружности (лопатки крыльчаток, турбин, роторов, направляющих аппаратов и др.); поверхности каналов находятся под углом (до  $350^\circ$ ) относительно направления потока газа и жидкости с изменением углов наклона каналов по его длине; геометрические параметры каналов изменяются в широком диапазоне; требования по шероховатости  $Ra = 0,63...3,2$  мкм, по точности  $0,1...0,3$  мм [1]. Финишная обработка (ФО) таких поверхностей традиционными методами затруднена или невозможна.

Мировая практика показывает, что финишные процессы являются наиболее трудоемкими, интенсивными и неконтролируемыми областями производства в изготовление прецизионных деталей: на их долю приходится не менее 15% от общих производственных затрат [2]. Поэтому выбор метода ФО закрытых каналов сложнопрофильных деталей играет важную роль в организации производства.

**Сравнительный анализ.** Целевой функцией сравнительного анализа было выбрано обеспечение требуемой величины шероховатости внутренних поверхностей закрытых каналов деталей, полученных литьем по выплавляемым моделям из коррозионностойких сталей аустенитно-мартенситного

типа. Проведенный анализ современного уровня технологий ФО таких каналов показал, что их можно классифицировать на восемь условных групп со некоторыми комбинациями.

Лазерная термическая обработка применяется для термической обработки и упрочнения поверхности [3]. При этом формируются микроструктуры в высоколегированных сталях переходного аустенитно-мартенситного класса [4, 5]. Однако существующие конструкции лазерных установок сложно использовать для финишной обработки закрытых каналов.

Основным механизмом удаления материала при электрохимической обработке (ЭХО) является процесс анодного растворения заготовки [6]. ЭХО аэродинамических профилей лопаточных колес показала, что позволяет получать шероховатость таких поверхностей  $Ra = 0,8 \dots 1,0$  мкм, при минимальном съеме материала [7]. Однако при этом конструкция колеса затрудняет доступ в межлопаточный канал и требует разработки специальной высокоточной оснастки для реализации процесса [8]. ЭХО не позволяет равномерно полировать поверхности сложной формы. Наблюдается явление растрава. Технология сухого электрохимического шлифования и полирования *DryLyte* с помощью переноса ионов металла посредством свободных твердых тел (цеолитов) осложняется сложной формой деталей типа лопаток газотурбинного двигателя [9].

Метод электролитно-плазменной обработки (ЭПО) основан на электроразрядных явлениях в системе металл-электролит. При напряжении более 200 В вокруг детали (анода) при переходе от пузырькового кипения к пленочному образуется устойчивая тонкая (50 – 100 мкм) парогазовая оболочка, в которой протекает сложный комплекс физико-химических процессов [10]. Наряду с достоинствами данный метод имеет и недостатки. К ним можно отнести следующие: невозможность одномоментной обработки больших изделий, высокие температуры обработки, значительный расход электроэнергии, неравномерность обработки по профилю изделия. Струйная ЭПО обладает преимуществами по сравнению с обработкой изделий в ванне [11]. Она позволяет вести обработку криволинейных поверхностей открытых каналов. Однако доступ катодного модуля с магнетронной распылительной головкой в закрытые каналы затруднен.

ЭПО внутренних поверхностей изделий сложной формы проводят с использованием дополнительного переключаемого гибкого катода [12]. Этот способ может обеспечить лишь локальную полировку отдельного канала переменной формы. Схема устройства для ЭПО внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны [13] не позволяет дать оценку форме применяемого катода и его расположения в обрабатываемом канале.

Традиционное вибрационное полирование различными гранулами в установках разного типа показала свою эффективность в обработке наружных поверхностей [14, 15]. Обработка изделий сверхмелкими абразивными средами позволяет достигать высокого качества поверхности, но при этом процесс носит длительный характер [16].

Обработка деталей в среде свободного абразива имеет богатые традиции [17, 18]. Финишная обработка деталей свободным абразивом в кавитирующей среде [19] позволяет вести полировку внутренней цилиндрической поверхности с достижением шероховатости  $Ra = 0,48$  мкм. Поверхностный слой материала получает дислокационное упрочнение, при котором возможно образование микротрещин [20]. При обработке сложнопрофильных деталей типа колес турбин эффективной является камерная обработка уплотненными мелкодисперсными абразивными средами [21]. Однако в закрытых каналах деталей типа крыльчатка сложно создать равномерный поток уплотненной среды.

Для обработки крыльчатки предложен способ, когда ее погружают в жидкостно-абразивную среду, приводят во вращение и обеспечивают самопрокачку среды по каналам крыльчатки [22]. При этом наблюдается недостаточная интенсивность обработки, вызванная наличием противодавления в выходных участках каналов крыльчатки. Этот недостаток устранен техническим решением, в котором входные участки каналов крыльчатки располагают на уровне, обеспечивающем их взаимодействие с обрабатываемой средой, а выходные участки – над ее уровнем. Данный способ позволил провести обработку проточных каналов литой крыльчатки и обеспечить шероховатость  $Ra = 0,6 \dots 1,8$  мкм [23].

Для отделочно-упрочняющей обработки каналов сложнопрофильных деталей предложен ряд комбинированных способов. Одним из таких методов является струйно-динамическая обработка. Детали, расположенной внутри цилиндрического контейнера с гранулированной рабочей средой, во время обработки передаются колебания от платформы вибромашины. Под действием низкочастотных вибраций за счет периодических знакопеременных переворотов контейнера происходит возвратно-поступательное перемещение среды по межлопаточным каналам детали [24]. В закрытых каналах

сложно обеспечить равномерность обработки. В ударно-импульсной обработке сужающихся криволинейных каналов шарики за счет импульсно-ударного механического воздействия создают стабильный микрорельеф без зон с микротрещинами и, совмещая упрочнение с электрохимическим воздействием, формируют заданную шероховатость по всем поверхностям лопатки [25].

Все большее применение находит метод обработки абразивным потоком (*abrasive flow machining*). В нашей стране он также известен как абразивно-экструзионная обработка или экструзионное хонингование. Механизм обработки этого способа заключается в сжимающем давлении на обрабатываемую поверхность при абразивном контакте с ней полутвердого, труднотекучего полимерного материала. Этот материал состоит из силиконовой среды, наполненной мелкодисперсными абразивными частицами. При течении поток рабочей среды удерживает под давлением полимерный материал в ограниченном абразивном контакте с обрабатываемой поверхностью [26].

Проведенные исследования показали, что данный метод дает возможность финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей и обеспечивает точность расхода компонентов топлива через эти каналы. Однако при этом наблюдается незначительная неравномерность обработки [27]. Она устраняется применением направляющего аппарата. Данный аппарат образует канал совместно с обрабатываемой поверхностью. При этом выходные сечения каналов направляющего аппарата аналогичны по форме и размерам входным сечениям межлопаточных каналов крыльчатки или меньше его размеров на величину коэффициента упругого восстановления струи абразивного потока. Сама обрабатываемая крыльчатка установлена в приспособление на цилиндрический палец и призматический палец для исключения проворачивания крыльчатки во время обработки [28].

**Выводы.** Сравнительный анализ показал, что требованиям целевой функции в установленных граничных условиях в наибольшей степени отвечает обработка абразивным потоком.

#### Библиографические ссылки

1. Сысоев, С. К. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов : теория, исслед., практика : монография / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев ; С.К. Сысоев, А.С. Сысоев ; Федер. агентство по образованию, Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетникова, 2005. ISBN 5-86433-245-3.
2. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review. Mali H.S., Manna A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture . 2009;223(7):809-820. doi: 10.1243/09544054JEM1311
3. S. Bonb. Laser transformation hardening of steel. Advances in Laser Materials Processing Technology, Research and Application. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. 2010, Pages 291-326 <https://doi.org/10.1533/9781845699819.4.291>
4. Особенности формирования структуры сталей при лазерном термическом цикле / Г. Н. Гаврилов, В. А. Кастро, И. Б. Брауэр, Е. С. Беляев // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 12. С. 38-41.
5. Исследование влияния воздействия лазерного излучения на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали / Т. В. Тарасова, С. Д. Кузьмин, И. С. Белашова [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 5(149). С. 221-225.
6. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении : Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова [и др.]. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2015. 240 с.
7. Лобода, А. А. Электрохимическая доводка аэродинамических профилей лопаточных колес / А. А. Лобода, С. А. Мозгов, Б. П. Саушкин // Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 2. № 2(16). С. 251-257.
8. Мозгов, С. А. Улучшение качества поверхностей лопаток моноколёс турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / С. А. Мозгов, Д. В. Панов, Б. П. Саушкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 4(42). С. 206-212.
9. Журавлев, О. С. Обработка поверхности детали перед нанесением покрытия с использованием технологии DRYLYTE / О. С. Журавлев, И. М. Смирнова // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. № 2(25). С. 36-38.

10. Бойченко, О. В. О внедрении технологии электролитно-плазменного полирования деталей, изготавливаемых из нержавеющей сталей / О. В. Бойченко, А. П. Воленко // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : Труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения), Тольятти, 27–29 мая 2015 года / Редакционная коллегия: А.В. Гордеев, В.И. Малышев, Л.А. Резников, А.С. Селиванов. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. С. 166-172.
11. Оценка возможности полирования нержавеющей сталей струйной электролитно-плазменной обработкой / М. В. Новоселов, Н. Г. Шиллинг, А. А. Рудакин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. № 1. С. 94-102. DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10.
12. Патент № 2699137 С1 Российская Федерация, МПК С25F 3/16. Способ обработки внутренней и внешней поверхности изделий, изготовленных аддитивным методом, и устройство, его реализующее : № 2019105336 : заявл. 25.02.2019 : опубл. 03.09.2019 / А. Х. Гильмутдинов, К. Ю. Нагулин, Э. С. Якшибаев.
13. Володин, А. Ю. Способ электролитно-плазменной обработки внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны корпусных деталей центробежных насосов жидкостных ракетных двигателей / А. Ю. Володин, Д. С. Заруба, Н. В. Величко // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 549-550.
14. Волков, Д. И. Методика определения параметров динамического взаимодействия абразивной гранулы и пера лопатки в круговых виброполировальных установках / Д. И. Волков, А. В. Толкачев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2015. № 1(32). С. 94-99.
15. Патент № 2686395 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/06. Способ вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей и вибрационный станок для отделочно-упрочняющей обработки деталей : № 2017146980 : заявл. 29.12.2017 : опубл. 25.04.2019 / А. Г. Березкин, Н. А. Исайкин, А. Ю. Лобанов.
16. Тищенко И.В., Рожков А.С., Богуцкий В.Б. Оптимизация технологических схем финишной обработки ЛВМ-отливок с применением вибрационно-роторных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №14. С. 43-46.
17. Авторское свидетельство № 867617 А1 СССР, МПК В24В 31/00. Способ обработки деталей в свободном абразиве и устройство для его осуществления : № 2894836 : заявл. 18.03.1980 : опубл. 30.09.1981 / В. М. Мигунов, Г. Н. Зацепин, А. Я. Качан, А. И. Попенко.
18. Авторское свидетельство № 1803308 А1 СССР, МПК В24В 31/104. Способ обработки деталей : № 4897925 : заявл. 29.12.1990 : опубл. 23.03.1993 / А. Н. Мартынов, В. А. Лемин, В. А. Скрябин [и др.].
19. Исследование процесса отделочной абразивной обработки внутренних поверхностей с применением эффекта вибрационной кавитации / А. С. Асаев, А. В. Иванайский, Н. В. Аверин, Д. И. Волков // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2021. № 4(59). С. 57-62.
20. Скрябин, В. А. Особенности обработки деталей из жаропрочных литейных сплавов незакрепленным мелкодисперсным шлифовальным материалом / В. А. Скрябин, А. Г. Схиртладзе, Е. В. Зотов // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 2(45). С. 25-28.
21. Скрябин, В. А. Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности / В. А. Скрябин // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 4. С. 552-561. DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.552-561.
22. Авторское свидетельство № 1555115 А1 СССР, МПК В24С 1/00, В24С 3/08. Способ обработки рабочих колес насосов и устройство для его осуществления : № 4421417 : заявл. 10.05.1988 : опубл. 07.04.1990 / В. Л. Парамей, С. Г. Парфененко, В. В. Калужный [и др.].
23. Патент № 2158671 С2 Российская Федерация, МПК В24С 1/00, В24С 3/18, В24С 7/00. Способ обработки поверхностей проточных каналов крыльчаток и устройство для его осуществления : № 97120635/02 : заявл. 10.12.1997 : опубл. 10.11.2000 / А. В. Левченко.
24. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей / А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 7(109). С. 20-23. DOI 10.30987/2223-4608-2020-7-20-23.

25. Некрылов, А. М. Импульсно-ударная обработка сужающихся межлопаточных каналов / А. М. Некрылов, С. Н. Коденцев, А. О. Родионов // Воронежский научно-технический Вестник. 2021. Т. 3. № 3(37). С. 36-41. DOI 10.34220/2311-8873-2022-36-41.
26. Patent no. 3521412, U.S., ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding / McCarty R.W. Filed 12.04.1968; published 21.07.1970.
27. Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко [и др.] // Технология машиностроения. 2007. № 6. С. 48-52.
28. Патент № 2751073 С1 Российская Федерация, МПК В24С 1/00. Способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток : № 2020136652 : заявл. 06.11.2020 : опубл. 07.07.2021 / Н. С. Теряев, В. А. Левко.

## References

1. Sysoev S. K., Sysoev A. S. *Ekstruzionnoye khoningovaniye detaley letatelnykh apparatov : teoriya, issled., praktika : monografiya* [Extrusion honing of aircraft parts: theory, research, practice: monograph] Krasnoyarsk: SibGAU, 2005.
2. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review. Mali H.S., Manna A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture . 2009;223(7):809-820. doi: 10.1243/09544054JEM1311
3. S. Bonb. Laser transformation hardening of steel. Advances in Laser Materials Processing Technology, Research and Application. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. 2010, Pages 291-326 <https://doi.org/10.1533/9781845699819.4.291>
4. Gavrilov G. N., Castro V. A., Brauer I. B., Belyaev E. S. [Peculiarities steel's structure formation in laser thermal cycle] *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2011. No. 12. P. 38-41. (In Russ.)
5. Tarasova T. V., Kuzmin S. D., Belashova I. S., Prokofiev M. V., Belokon T. D. [Research of the influence of the laser radiation effect on the microstructure and properties of corrosionresistant steel] *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. 2017. No. 5(149). P. 221-225 (In Russ.)
6. Polyanchikov Yu. N., Skhirtladze A. G., Vorontsova A. N. Electrochemical and electrophysical processing methods in modern mechanical engineering. [A textbook for students of higher educational institutions studying in the field of training "Design and technological support of machine-building industries"]. Volgograd. Volgograd State Technical University, 2015. 240 p. (In Russ.)
7. Loboda A. A., Mozgov S. A., Saushkin B. P. [Electrochemical finishing of airfoil blade wheels] *Izvestiya MSTU MAMI*. 2013. Vol. 2. No. 2(16). P. 251-257. (In Russ.)
8. Mozgov S. A., Panov D. V., Saushkin B. P. [Improvement of the quality of the surfaces of monowheel blades of liquid rocket engine turbopump assemblies] *VESTNIK SAMARSKOGO GOSUDARSTVENNOGO AEROKOSMICHESKOGO UNIVERSITETA IM. AKADEMIKA S.P. KOROLĖVA (NATSIONALNOGO ISSLEDOVATELSKOGO UNIVERSITETA)*. 2013. No. 4(42). P. 206-212 (In Russ.)
9. Zhuravlev O. S., Smirnova I. M. [Part surface treatment before coating using DRYLYTE technology] *Molodezhnyy vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021. No. 2(25). P. 36-38. (In Russ.)
10. Boychenko O. V., Volenko A. P. [On the introduction of technology for electrolytic-plasma polishing of parts made of stainless steels] *Teplofizicheskiye i tekhnologicheskkiye aspekty povysheniya effektivnosti mashinostroyitel'nogo proizvodstva : Trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Reznikovskiy chteniya)* [Thermophysical and technological aspects of improving the efficiency of machine-building production: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference (Reznikov Readings)] Togliatti, 2015. P. 166-172. (In Russ.)
11. Novoselov M. V., Shilling N. G., Rudavin A. A., Radkevich M. M., Popov A. I. [Assessment of a possibility polishing of stainless steels jet electrolytic and plasma processing] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2018. Vol. 20. No. 1. P. 94-102. (In Russ.) DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10.
12. Gilmutdinov A. Kh, Nagulin K. Yu., Yakshibaev E. S. *Sposob obrabotki vnutrenney i vneshney poverkhnosti izdeliy, izgotovlennykh additivnym metodom, i ustroystvo, yego realizuyushcheye* [Method for treatment of inner and outer surfaces of articles made by an additive method, and a device for its implementation] Patent RF, No. 2699137, 2019.

13. Volodin A. Yu., Zaruba D. S., Velichko N. V. [Method of electrolyte-plasma treatment of the internal space-complex surfaces of different curvature of body parts of LRE centrifugal pumps] *Reshetnevskiyе chteniya*. 2016. Vol. 1. P. 549-550. (In Russ.)
14. Volkov D. I., Tolkachev A. V. [Method for Determining the Parameters of Dynamic Interaction between an Abrasive Granule and a Blade Airfoil in Circular Vibratory Polishing Machines] *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solov'yeva*. 2015. No. 1(32). P. 94-99. (In Russ.)
15. Berezkin A. G., Isaikin N. A., Lobanov A. Yu. *Sposob vibratsionnoy odelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley i vibratsionnyy stanok dlya odelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley* [Parts finishing and strengthening vibration processing method and vibration machine for the parts finishing and strengthening processing] Patent RF, No. 2686395, 2019.
16. Tishchenko I. V., Rozhkov A. S., Bogutskiy V. B. [Optimisation of the finishing technological schemes of investment castings with vibratory-rotary machine tools] *Transportnoye, gornoye i stroitel'noye mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo*. 2022. No. 14. P. 43-46. (In Russ.)
17. Migunov V. M., Zatepin G. N., Kachan A. Ya., Popenko A. I. *Sposob obrabotki detaley v svobodnom abrazivе i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for processing parts in a free abrasive and a device for its implementation] Patent SU, No. 867617, 1981.
18. Martynov A. N., Lemin V. A., Skryabin V. A. et al. *Sposob obrabotki detaley* [Parts Processing Method] Patent SU, No. 4897925, 1993.
19. Asaev A. S., Ivanaysky A. V., Averin N. V., Volkov D. I. [Investigation of finish abrasive processing of internal surfaces with the use of vibratory cavitation effect] *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solov'yeva*. 2021. No. 4(59). P. 57-62. (In Russ.)
20. Skryabin V. A., Skhirtladze A. G., Zotov E. V. [Features of machining parts from heat resisting cast alloys with unattached fine polishing material] *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2018. No. 2(45). P. 25-28. (In Russ.)
21. Skryabin V. A. [The installation for processing of parts with a complex profile of working surface] *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2018. Vol. 28. No. 4. P. 552-561. (In Russ.) DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.552-561.
22. Paramey V. L., Parfenenko S. G., Kalyuzhny V. V. et al. *Sposob obrabotki rabochikh koles nasosov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for processing pump impellers and device for its implementation] Patent SU, No. 1555115, 1990.
23. Levchenko A. V. *Sposob obrabotki poverkhnostey protochnykh kanalov krylchatok i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method of treatment of surfaces of impeller flow-through channels and device used for its embodiment] Patent RF, No. 2158671, 2000.
24. Nekrylov A., Grymzin A., Podgornov S., Sokolnikov V., Suhochev G. [Strengthening and finishing of hard-to-reach technological flow channels of parts] *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2020. No. 7(109). P. 20-23. (In Russ.) DOI 10.30987/2223-4608-2020-7-20-23.
25. Nekrylov A. M., Kodentsev S. N., Rodionov A. O. [Pulse-shock treatment of narrowing inter-pump channels] *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy Vestnik*. 2021. Vol. 3. No. 3(37). P. 36-41. (In Russ.) DOI 10.34220/2311-8873-2022-36-41.
26. Patent no. 3521412, U.S., ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding / McCarty R.W. Filed 12.04.1968; published 21.07.1970.
27. Sysoev S. K., Sysoev A. S., Levko V. A., Snetkov P. A. and Lubnin M. A. [Ensuring the accuracy of the flow of fuel components through the channels of parts processed by extrusion honing] *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2007. No.6. P. 48-52. (In Russ.)
28. Teryaev N. S., Levko V. A. *Sposob obrabotki abrazivnym potokom mezhlopatochnykh kanalov krylchatok* [method for treatment of intervalley channels of impellers by abrasive flow] Patent RF, No. 2751073, 2021.

УДК621.923.01

## ОБЗОР МИРОВОГО ОПЫТА МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

О. В. Литовка, 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 litovka.9518@gmail.com

*Произведен критический обзор мировых исследований в области моделирования контактных взаимодействий, происходящих в процессе обработки абразивным потоком сложнопрофильных деталей ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: обработка абразивным потоком, моделирование.*

## REVIEW OF THE WORLD EXPERIENCE IN MODELING CONTACT INTERACTIONS OF THE ABRASIVE FLOW MACHINING

O. V. Litovka, V. A. Levko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail litovka.9518@gmail.com

*A critical review of world research in the field of modeling contact interactions occurring in the process of abrasive flow machining in the manufacture of complex-profile parts of rocket and space technology has been carried out.*

*Keywords: abrasive flow machining, modeling.*

**Введение.** Производство изделий ракетно-космической техники сложный и трудоемкий процесс, включающий в себя изготовление деталей специального назначения, имеющих сложную конфигурацию с повышенным требованием к качеству поверхностного слоя. Такие детали, зачастую, невозможно обработать традиционными методами чистовой обработки, что приводит к применению альтернативных решений и одним из таких способов является метод обработки абразивным потоком.

Обработка абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*), экструзионное хонингование или абразивно-экструзионная обработка представляет собой многократное продавливание полимерной среды, наполненной абразивными частицами, через обрабатываемую деталь. Снятие материала при *AFM* осуществляется путем контактного взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки [1].

Проведенные визуальные исследования процесса течения потока рабочей среды выявили образование в потоке цепочек абразивных зерен [2]. Траектория движения цепочки абразивных частиц соответствует траектории сдвигового течения рабочей среды, но предсказать точное поведение частицы и конечный результат обработки сложно из-за множества переменных факторов.

Такая непредсказуемость затрудняет внедрение процесса *AFM* деталей сложного профиля, так как перед использованием необходимо проводить множество экспериментов, подбирая оптимальные параметры обработки. Попытки моделирования *AFM* ведутся многими учеными и совершенствуются с развитием технологических возможностей, но проблема расхождения результатов моделирования с экспериментальными данными не решена.

**Моделирование процесса.** Хаан и Стейф [3] проводили первые попытки моделирования изменения размера абразивных частиц во время обработки. Применив математическую модель расчёта по методу конечных элементов спрогнозировали износостойкость абразивных частиц в диапазоне от  $10^3$  до  $10^5$ . Кумар [4], используя метод конечных элементов, построил теоретическую модель расчета на-

пряжения, действующего на абразивную частицу, но аналитические результаты расходятся с экспериментальными.

Мали и Манна [5] разработали математическую модель, основанную на уравнениях полиномиальной регрессии. Изменяя различные параметры обработки, они установили, что значимыми факторами для улучшения средней шероховатости поверхности являются размер и концентрация абразивных частиц. Такая модель применима для первоначального выбора параметров процесса обработки. Ульман и др. [6] провели моделирование на основе вычислительной гидродинамики и получили адекватную модель для определения оптимальных параметров процесса с учетом температуры и времени обработки. Однако и в этой модели расхождение с экспериментальными данными остаются существенными.

Джайн и Джайн [7], применив стохастическое моделирование с использованием генерации случайных чисел, получили прямую зависимость увеличения плотности среды с увеличением размера и концентрации абразива. Данная модель позволяет прогнозировать активную плотность зерен при любой концентрации и размере абразива. Горана и др. [8] вывели теоретическую модель, отражающую значительное влияние осевой и радиальной силы, а также плотности и глубины вдавливания зерен на деформацию материала заготовки.

Сингх [9] разработал теоретическую модель зависимости шероховатости поверхности от количества циклов и давления экструзии. Результаты, полученные на основе модели, незначительно отличались от экспериментальных данных.

Рассмотренные выше модели не позволяют в полной мере спрогнозировать производительность процесса обработки и шероховатость поверхности. В данных моделях не учтено влияние формирующихся в потоке абразивных цепочек. Для уточнения процесса моделирования контактных взаимодействий предложено, что абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность как по фактической площади контакта, так и по контурной. При этом появление составляющих силы резания, действующей на единичное абразивное зерно, обусловлено касательными и нормальными напряжениями потока рабочей средой [10].

**Вывод.** Учет влияния абразивных цепочек на процесс течения потока рабочей среды позволяет существенно увеличить точность моделирования процесса.

### Библиографические ссылки

1. Сысоев, С. К. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов : теория, исслед., практика : монография / С.К. Сысоев, А.С. Сысоев ; Федер. агентство по образованию, Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М. Ф. Решетникова, 2005.
2. Research the influence finishing canal shape to flow media for abrasive flow machining process / V. A. Levko, M. A. Lubnin, P. A. Snetkov [et al.] // Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems. 2009. No 5(26). P. 93-99.
3. Haan JJ, Steif PS (1998) Abrasive wear due to the slow flow of a concentrated suspension. *Wear* 219(2):177–183. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00191-4)
4. Kumar TR (1998) Theoretical and experimental investigations into abrasive flow machining process, M. Tech. Thesis, ИТ Kanpur
5. Mali HS, Manna A (2010) Optimum selection of abrasive flow machining conditions during fine finishing of Al/15 wt% SiMMC using Taguchi method. *Int J AdvManufTechnol* 50(9):1013–1024. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2565-y>
6. Uhlmann E, Mihotovic V, Coenen A (2009) Modelling the abrasive flow machining process on advanced ceramic materials. *J MaterProcess Technol* 209(20):6062–6066. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.06.019>
7. Jain RK, Jain VK (2001) Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process. *Int J Mach ToolsManuf* 41(12):1689–1704. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00043-8)
8. Gorana VK, Jain VK, Lal GK (2006) Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. *Wear* 260(1):128–139. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038>
9. Singh S, Raj ASA, Sankar MR, Jain VK (2016) Finishing force analysis and simulation of nano surface roughness in abrasive flow finishing process using rheological properties. *Int J AdvManufTechnol* 85(9):2163–2178. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8333-2>

10. Левко, В. А. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена / В. А. Левко, Д. И. Савин, О. В. Литовка // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1(150). С. 36-51. DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51.

### References

1. Sysoev S.K., Sysoev A.S. Extrusion honing of aircraft parts: theory, research, practice: monograph. Sib. state aerospace un-ty M.F. Reshetneva, 2005.
2. Research the influence finishing canal shape to flow media for abrasive flow machining process / V. A. Levko, M. A. Lubnin, P. A. Snetkov [et al.] // Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems. 2009. No 5(26). P. 93-99.
3. Haan JJ, Steif PS (1998) Abrasive wear due to the slow flow of a concentrated suspension. *Wear* 219(2):177–183. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00191-4)
4. Kumar TR (1998) Theoretical and experimental investigations into abrasive flow machining process, M. Tech. Thesis, IIT Kanpur
5. Mali HS, Manna A (2010) Optimum selection of abrasive flow machining conditions during fine finishing of Al/15 wt% SiCMMC using Taguchi method. *Int J AdvManufTechnol* 50(9): 1013–1024. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2565-y>
6. UhlmannE, Mihotovic V, Coenen A (2009) Modelling the abrasive flow machining process on advanced ceramic materials. *J Mater Process Technol* 209(20):6062–6066. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.06.019>
7. Jain RK, Jain VK (2001) Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process. *Int J Mach ToolsManuf* 41(12):1689–1704. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00043-8)
8. Gorana VK, Jain VK, Lal GK (2006) Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. *Wear* 260(1): 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038>
9. Singh S, Raj ASA, Sankar MR, Jain VK (2016) Finishing force analysis and simulation of nano surface roughness in abrasive flow finishing process using medium rheological properties. *Int J AdvManufTechnol* 85(9):2163–2178
10. Levko V.A., Savin D.I., Litovka O.V. Contact interactions in abrasive flow machining by high viscosity media of workpieces from powder molybdenum alloys. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020, no.24(1), p. 36–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-00-00>

© Литовка О. В., Левко В. А., 2022

УДК 007.52:629.7.018.4

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДА РАСКРЫТИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА

И. А. Маркелов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: sosneetsky@gmail.com

*В работе предоставлено описание устройства, использующегося при испытаниях привода раскрытия трансформируемого рефлектора космического аппарата.*

*Ключевые слова: электропривод, силовые испытания, автоматическое управление.*

## TEST DEVICE FOR DEPLOYABLE REFLECTOR'S OPENING DRIVE

I. A. Markelov

Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: sosneetsky@gmail.com

*The paper presents specification of a device used for testing of deployable reflector's opening drive.*

*Keywords: electric drive, strength test, automatic control.*

**Введение.** В процессе изготовления космических аппаратов одним из этапов является испытание различных компонентов и узлов. Отдельно можно выделить испытания трансформируемых механических система аппарата, таких как рефлекторы, солнечные батареи т.д. При их испытании используются как пассивные устройства и приспособления, использующие пружины, противовесы и грузы, так и активные, в которых для создания необходимых усилий применяются привода. В испытательной технике всё активнее применяется электропривод, позволяющий значительно повысить точность проводимых испытаний [1].

**Объект испытаний.** Объектом испытаний служит линейный электропривод раскрытия рефлектора, который состоит из двигателя постоянного тока, редуктора и ременной передачи. Зубья рейки расположены на штоке привода, который соединяется испытательным оборудованием посредством присоединительного фланца с крепёжным отверстием. Для защиты от перегрузки привод оснащается предохранительной муфтой. Характеристики привода приведены в табл. 1

Таблица 1

Технические характеристики привода раскрытия рефлектора

Напряжение питания, В	27
Рабочий ход штока привода, мм	158
Максимальное усилие на штоке привода, Н (кгс)	2940 (300)

При раскрытии рефлектора усилие, развиваемое приводом для преодоления сопротивления со стороны механизмов, изменяется, и наибольшее значение усилия достигается в конце хода. Испытания проводят в двух режимах: режим «сжатия» и «натяжения». Также в процессе испытаний проводится проверка работоспособности предохранительной муфты.

**Состав устройства.** Устройство состоит из двух подсистем: механической и электрической. Механическая часть устройства представлена на рис. 1. Основными компонентами механической подсистемы являются электропривод 2, электроцилиндр 3 и тензометрический датчик 4. Эти компоненты

установлены на раму 5 при помощи кронштейнов 6. На эту же раму устанавливается и испытуемый привод 1.

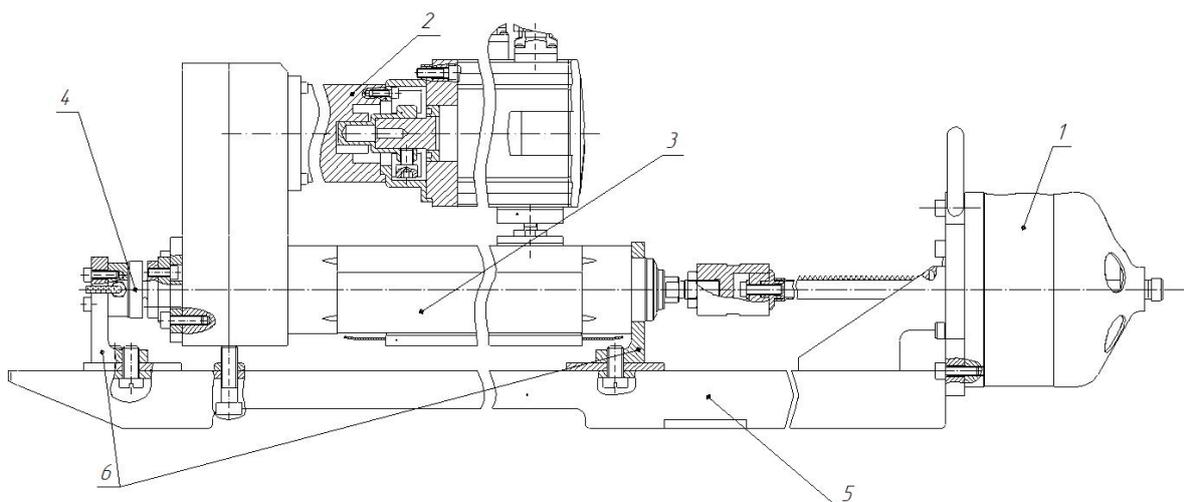


Рис. 1. Механическая подсистема испытательного устройства

Электрическая подсистема выполнена в виде электрошкафа управления. На дверце шкафа установлена сенсорная панель оператора, световые индикаторы и кнопка аварийного стопа. Внутри шкафа установлены источник питания постоянного тока, программируемый логический контроллер и сервоусилитель. ПЛК используется для управления электроприводом, сбора и обработки данных с тензометрического датчика, а также для передачи данных на панель оператора.

**Подготовка и проведение испытаний.** Перед началом испытаний привод раскрытия рефлектора устанавливается на раму, затем штоки привода раскрытия и электроцилиндра жёстко соединяются муфтой. После этого оператор выбирает режим и проводит настройку параметров испытаний. Настройка параметров проводится при помощи сенсорной панели оператора. Панель хранит в своей памяти несколько экранов, каждый из которых соответствует определённому режиму. Таких режимов три: «Сжатие», «Растяжение» и «Проверка муфты».

В первых двух режимах ход привода раскрытия делится на два интервала: интервал с пониженной нагрузкой и интервал с максимальной нагрузкой. На экранах режимов возможность ввода длины хода каждого интервала и создаваемой на его протяжении нагрузки. Помимо этого, на экране отображаются текущая позиция и усилие на тензодатчике.

Третий режим позволяет настроить ход штока электроцилиндра, усилие, которое должен создать электроцилиндр устройства, а также установить отсечку, при которой предохранительная муфта считается сработавшей. Если усилие, регистрируемое тензометрическим датчиком, изменяется на величину отсечки за короткий период времени, то система управления определяет это изменение как срабатывание муфты, и испытания завершаются. Также в этом режиме муфту можно испытать как сжатием, так и растяжением, подобно тому, как это реализовано в режимах «Сжатие» и «Растяжение».

Характер нагружения привода раскрытия рефлектора определяется выбранным режимом. В режиме «Сжатие» усилие штока электроцилиндра действует на шток испытываемого привода в направлении его движения (рис. 3). В режиме «Растяжение» направление усилия противоположно, т.е. шток электроцилиндра препятствует втягиванию штока привода раскрытия (рис. 2). Система управления состоит из двух контуров: за внутренний контур отвечает регулятор, реализуемый алгоритмами в сервоусилителе и обеспечивающий поддержание необходимой линейной скорости штока электроцилиндра. В свою очередь скорость является выходной величиной регулятора внешнего контура, в то время как входной является усилие на штоке электроцилиндра, получаемое с тензометрического датчика. Такая двухконтурная система позволяет поддерживать усилие на штоке привода раскрытия в узком диапазоне [2].

Во время испытаний оператор может следить за процессом как при помощи показаний в полях вывода, так и при помощи экрана графиков, на котором выводится диаграмма «ход/усилие». Также

при необходимости использования этого графика в отчётности или для последующего анализа может быть создан PDF-файл, который затем может быть загружен на USB-носитель.

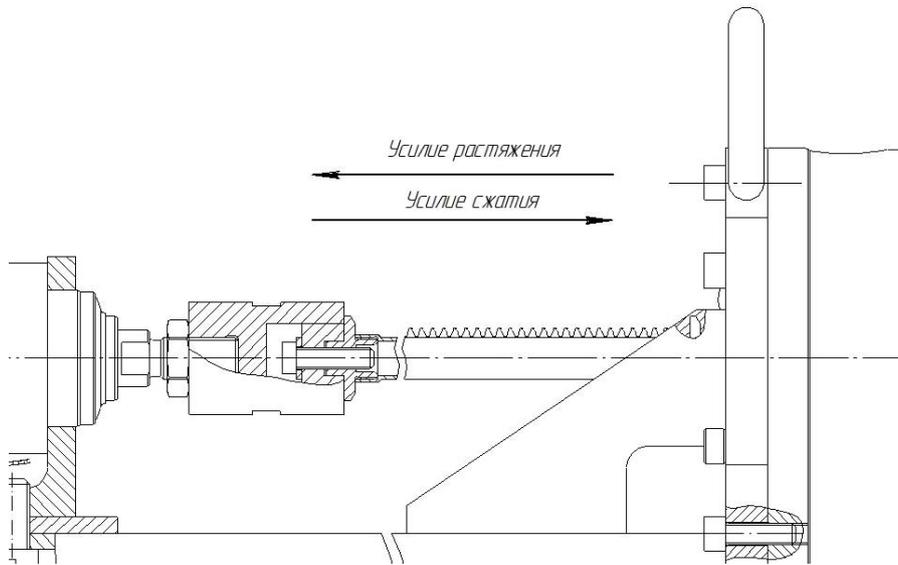


Рис. 2. Направление усилий, создаваемых электроцилиндром

**Результаты.** В ходе разработки программного обеспечения системы управления устройством и после ввода в эксплуатацию была достигнута точность воспроизводимого усилия  $\pm 29,4$  Н ( $\pm 3$  кгс). Для определения точности использовался поверенный тензометрический датчик. В процессе испытаний одного из образцов колебания усилия, измеряемого тензометрическим датчиком устройства, находились в пределах  $\pm 49$  Н ( $\pm 5$  кгс).

#### Библиографические ссылки

1. Пат. 208798 Российская Федерация, МПК G01N 3/00. Устройство для испытания сотовых панелей / Агашкин С. В., Башкарев В. С., Маркелов И.А. № 2021128970; заявл. 05.10.2021; опубл. 13.01.2022, Бюл. № 2.
2. Bishop R.H. The Mechatronics Handbook. Mechatronic System Control, Logic and Data Acquisition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008, 755 p.

#### References

1. Agashkin S.V., Bashkarev V.S., Markelov I. A. *Ustroystvo dlya ispytaniya sotovykh paneley* [Honeycomb panel testing device]. Patent RF, no. 208798, 2022.
2. Bishop R.H. The Mechatronics Handbook. Mechatronic System Control, Logic and Data Acquisition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008, 755 p.

© Маркелов И. А., 2022

УДК 62-529

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ БИОНИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ

А. О. Панаськов\*, Я. Е. Шумилина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: panaskov79@gmail.com

*Проведено исследование вращательно-вращательного закона движения машущего крыла подводного аппарата, выведена формула закона движения, описана получаемая поверхность, а также выведена формула для расчета площади поверхности машущего крыла.*

*Ключевые слова: машущее крыло, подводный аппарат, гидродинамика, закон движения, бионические системы.*

## INVESTIGATION OF THE TRANSITIONAL FUNCTION OF THE BIONIC PROPULSION UNIT

A. O. Panaskov\*, Y. E. Shumilina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: panaskov79@gmail.com

*The rotational-rotational law of motion of the flapping wing of an underwater vehicle was researched, the formula for the law of motion was derived, the resulting surface was described, and the formula for calculating the surface area of the flapping wing was also derived.*

*Keywords: flapping wing, underwater vehicle, hydrodynamics, law of motion, bionic systems*

Одним из самых распространённых типов движителей является машущее крыло. Существует множество работ, посвященных исследованию гидродинамики бионических движителей, однако в основном в них рассматриваются движители с поступательным и вращательным движением пластины или пластины с упругим элементом [1]. Однако системы управления с таким типом движителей остается малоизученным. В основном это связано со сложностью математического описания движения как самого движителя, так и расчет силы тяги, обеспечиваемой данным движителем.

В предыдущей работе рассматривалась структурная схема фильтра данных акселерометра и гироскопа на основе фильтра Маджвика для подводного необитаемого аппарата с бионическим движителем типа машущего крыла [2]. Там рассматривалась система навигации и ориентации, не учитывающая собственную силу тяги аппарата, а оценивающая только результат такого влияния. Однако для полноценного описания структурной схемы автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) необходимо выделить переходную функцию машущего движителя. Изучаемое машущее крыло подводного аппарата представленного на рис. 1 имеет вращательно-вращательное движение.

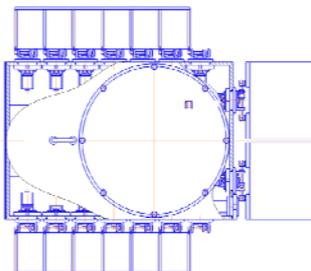


Рис. 1. Схема бионического подводного робота

Нам необходимо рассмотреть обтекание профиля крыла совершающего вращательно-угловые колебания в набегающем потоке несжимаемой жидкости. Для определения силы тяги такого машущего крыла, необходимо максимально точно описать закон его движения.

Спица с закрепленным на ней материалом совершает вращательное движение, что можно описать следующей формулой:

$$\alpha = \omega t + \alpha_0.$$

Также необходимо учесть амплитуду совершаемых колебаний спицы, тем самым формула имеет следующий вид: аппликата

$$\phi = \varphi \sin(\omega t + \alpha_0).$$

Зная описание движения спицы, необходимо составить выражение для получаемой поверхности с учетом длины спицы. Для оси ординат выражение будет иметь следующий вид:

$$y = y_0 + l \cos(\varphi \sin(\omega t + \alpha_0)).$$

Для оси абсцисс:

$$x = t_0 + t.$$

Для оси аппликат:

$$z = z_0 + l \sin(\varphi \sin(\omega t + \alpha_0)).$$

Тем самым мы получили параметрическую функцию поверхности, получаемой при вращении спицы с закреплённым на ней полотном, с параметрами времени и длины спицы. На рис.2 и рис.3 приведен график поверхности для различных угловых скоростей при длине спицы равной 10 и времени 10.

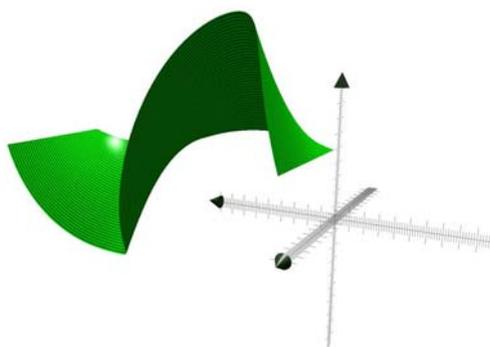


Рис. 2. График поверхности машущего крыла АНПА при  $\omega = \pi/5$ ,  $\alpha_0 = 0$

Полученный закон нам также необходим для расчета площади поверхности. Для этого необходимо преобразовать полученную параметрическую функцию, так как площадь поверхности заданной параметрической функцией можно определить по следующей формуле [3, 4]:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \int_{l_1}^{l_2} \sqrt{[\vec{r}_l \times \vec{r}_t]} dl dt.$$

Для этого необходимо определить векторы нормалей по каждому из параметров. Тем самым формула определения площади полученной поверхности имеет следующий вид:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \int_{l_1}^{l_2} \sqrt{(\sin^2(\varphi \sin(\omega t + \alpha_0)) \cdot \omega \varphi l \cdot \cos(\omega t + \alpha_0))^2 + 1} dl dt$$

Можно увидеть, что полученное выражение схоже с описанием функции Бесселя [5]. На данный момент математические пакеты данную функцию не могут разрешить, хоть численное решение подынтегрального выражения возможно. Для дальнейших расчетов силы и построения передаточной функции машущего крыла для системы автоматического управления необходимы дополнительные изыскания в преобразованиях функции Бесселя.

Полученное выражение описывает вращательно-вращательное движения машущего крыла с любой амплитудой, угловой скоростью спицы, а также учитывает длину самой спицы, что позволяет промоделировать поверхность крыла при таком движении.

### Библиографические ссылки

1. Рыжов В., Тарасов С. Математическое моделирование экологически чистого энергосберегающего движителя типа машущее крыло // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. №7(96). с. 221-228.
2. Панаськов А. О., Шумилина Я. Е. Разработка структурной схемы фильтра данных акселерометра подводного аппарата на основе метода Маджвика // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: докл. сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (11-15 апреля 2022 г., г. Красноярск)
3. Господариков А. П., Карпова Е. А., Мансурова С. Е. Высшая математика. В 6 т. Т. 1 Линейная алгебра. Векторная алгебра. Аналитическая геометрия. СПб.: Национальный минеральный университет «Горный», 2015. с.105.
4. Господариков А. П., Карпова Е. А., Мансурова С. Е. Высшая математика. В 6 т. Т. 3. Элементы высшей алгебры. Интегральное исчисление функций одной переменной и его приложения. СПб.: Национальный минеральный университет «Горный», 2015. с.102.
5. Гаврилов В. С., Денисова Н. А., Калинин А. В. Функции Бесселя в задачах математической физики: учеб. метод. пособие. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского университета, 2014. 40с.

### References

1. Ryzhov V., Tarasov S. *Matematicheskoe modelirovanie ekologicheski chistogo energosberegayushchego dvizhitelya tipa mashushchee krylo* [Mathematical modeling of an environmentally friendly energy-saving propulsion device of the flapping wing type]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2009, No. 7 (96), P. 221-228. (In Russ.)
2. Panaskov A. O., Shumilina Y. E. [Razrabotka strukturnoy skhemy fil'tra dannykh akselerometra podvodnogo apparata na osnove metoda Madzhvika]. *Materials VIII Intern. Scientific. Conf. "Actual problems of aviation and astronautics"*. Krasnoyarsk, 2022 (In Russ.)
3. Gospodarikov A. P., Karpova E. A., Mansurova S. E. *Vyssshaya matematika. V 6 t. T. 3. Elementy vysshey algebry. Integral'noe ischislenie funktsiy odnoy peremennoy i ego prilozheniya*. [Higher maths. Vol. 3. Elements of higher algebra. Integral calculus of functions of one variable and its applications] Natsional'nyy mineral'nyy universitet «Gornyy», 2015. P.102.
4. Gospodarikov A. P., Karpova E. A., Mansurova S. E. *Vyssshaya matematika. V 6 t. T. 3. Elementy vysshey algebry. Integral'noe ischislenie funktsiy odnoy peremennoy i ego prilozheniya*. [Higher Mathematics. Vol. 3. Elements of higher algebra. Integral calculus of functions of one variable and its applications]. Natsionalnyy mineralnyy universitet «Gornyy», 2015. P.102.
5. Gavrilov V. S., Denisova N. A., Kalinin A. V. *Funktsii Besselya v zadachakh matematicheskoy fiziki* [Bessel functions in problems of mathematical physics]. *Izdatel'stvo Nizhegorodskogo universiteta*, 2014, P. 40.

© Панаськов А. О., Шумилина Я. Е., 2022

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.В. Поляковская<sup>1</sup>, А. А. Карсакова<sup>1</sup>, А. А. Колесникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: polyakvlad@mail.ru

*В данной работе приведено обозначение композитных материалов, выявлена выгода использования композитов в машиностроении.*

*Ключевые слова: композиционный материал, углеродное волокно, промышленность.*

## COMPOSITE MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING

A. V. Polyakovskaya<sup>1</sup>, A. A. Korsakova<sup>1</sup>, A. A. Kolesnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University,  
12a, Kirova Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
<sup>2</sup>Academician M.F Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: polyakvlad@mail.ru

*In this paper, the designation of composite materials is given, the benefits of using composites in mechanical engineering are revealed.*

*Keywords: composite material, carbon fiber, industry.*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают уникальными свойствами, благодаря чему используются во многих отраслях промышленности [1]. Дальнейшее усовершенствование и расширение сфер их применения являются важными задачами с точки зрения научно-технического развития страны и современных технологий. Повышение требований к качеству и безопасности используемых материалов требует создания и применения новых форм. Материалы из углеродного волокна наиболее полно отвечают современным требованиям, так как обладают рядом уникальных характеристик и демонстрируют наилучшее соотношение цены и качества [2].

Композиционный материал (КМ), композит – многокомпонентный материал, изготовленный (человеком или природой) из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые, в сочетании, приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов и не являющимися простой их суперпозицией [3].

Композиты формируются путем объединения разнородных материалов рис. 1 в общую структуру, свойства которой сильно отличаются от свойств отдельных компонентов [4].

Композитные материалы заметно потеснили на рынке привычный металл. Причём не только сталь, но и алюминиевые сплавы, которые до недавнего времени считались во всех отношениях лучшими.

Углеродное волокно – это то, что в первую очередь слышим про композиционный материал, он используется уже много лет, и с каждым годом его применение растёт. Состоит из тонких нитей диаметром от 5 до 10 мкм, образованных атомами углерода. Атомы углерода объединены в микроскопические кристаллы, выровненные параллельно друг другу.

Области применения композиционных материалов многочисленны. В настоящее время широко применяют композиционные материалы для изготовления подшипников скольжения, манжет, уплот-

нительных колец, прокладок гидравлических систем (станков, автомобилей), механических устройств, уплотнений поршневых и плунжерных компрессоров, направляющих тросов автомобилей, промышленных и строительных машин, скользящих опор машин, дисков сцепления для точных механизмов, деталей систем управления, системы нейтрализации газа, системы реверсивного устройства двигателя.

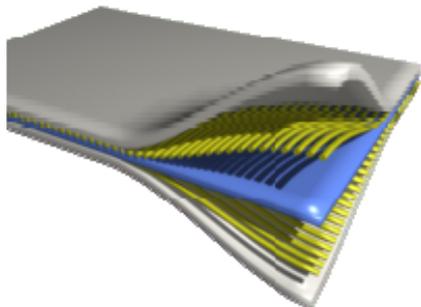


Рис. 1. Структура композиционного материала



Рис. 2. Углеродное волокно

Таким образом, использование композитов в машиностроении позволяет снизить массу изделия на 20-25% [5].

#### Библиографические ссылки

1. Е.Н. Каблов «Композиты: сегодня завтра» [Электронный ресурс]. URL: <https://viam.ru/news/2108> (дата обращения 06.09.2022).
2. Композитный материал в автомобилестроении [Электронный ресурс]. URL: <https://ktzcomposit.ru/responsible-to-environment/> (дата обращения: 07.09.2021)
3. Композитный материал [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 07.09.2021).
4. Углеродное волокно [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 07.09.2021).
5. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении / Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев и др. СПб: СпецЛит, 1999.

#### References

1. E.N. Kablov "Composites: today tomorrow". [Electronic resource]. URL: <https://viam.ru/news/2108> (accessed 06.09.2022).
2. Composite material in the automotive industry [Electronic resource]. URL: <https://ktzcomposit.ru/responsible-to-environment/> (date of reference: 07.09.2021)
3. Composite material [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org> (date of reference: 07.09.2021).
4. Carbon fiber [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org> (date of reference: 07.09.2021).
5. Composite materials in rocket and spacecraft engineering / G.P. Gardymov, E.V. Meshkov, A.V. Pchelintsev et al. SPb: SpetsLit, 1999.

© Поляковская А. В., Карсакова А. А., Колесникова А. А., 2022

УДК 621.8-1

## ПОСТРОЕНИЕ УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОБОЙНОГО ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА В ПОДВЕСКЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

С. В. Репин, Д. С. Орлов \*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4  
\*E-mail: 5750195@mail.ru

*Моделирование работы нового гидропневматического амортизатора (ГПА), снабженного двумя газовыми пружинами, расположенными сверху и снизу от гидравлической части амортизатора и исключаяющими его пробой на фазах и сжатия и отбоя, установленного на базовое шасси транспортирующего ракетно-космические модули и оборудование.*

*Ключевые слова: упругая характеристика, пневмогидравлический амортизатор, плавность хода, подвеска машин, конструкция амортизатора*

## CONSTRUCTION OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF A PUNCH-FREE PNEUMO-HYDRAULIC SHOCK ABSORBER IN THE SUSPENSION OF A TRANSPORT-TECHNOLOGICAL MACHINE

S. V. Repin, D. S. Orlov \*

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya ul., Saint Petersburg, Russia, 190005  
\*E-mail: 5750195@mail.ru

*Simulation of the operation of a new hydropneumatic shock absorber (HPA) equipped with two gas springs located above and below the hydraulic part of the shock absorber and excluding its breakdown in the phases and compression and rebound of the vehicle installed on the base chassis transporting rocket and space modules and equipment.*

*Ключевые слова на английском языке: elastic characteristic, pneumohydraulic shock absorber, ride smoothness, machine suspension, shock absorber design*

**Введение.** Плавность хода транспортных средств обеспечивается подвеской – системой устройств упругого соединения осей колес с кузовом для поглощения и смягчения ударов и толчков, возникающих при движении по дороге.

В настоящей статье выполнено моделирование работы нового гидропневматического амортизатора (ГПА), снабженного двумя газовыми пружинами, расположенными сверху и снизу от гидравлической части амортизатора и исключаяющими его пробой на фазах и сжатия и отбоя, установленного на базовое шасси транспортирующего ракетно-космические модули и оборудование.

### **Описание конструкции амортизатора**

Пневмогидравлический амортизатор содержит внешний цилиндрический резервуар 1, заполненный газом под давлением и расположенный внутри него рабочий цилиндр 2, заполненный жидкостью. Цилиндр 2 установлен с возможностью перемещения внутри цилиндра 1 и поверхность контакта внешней стенки цилиндра 2 и с внутренней стенкой цилиндра 1 уплотнена резиновыми манжетами. Цилиндр 2 разделяет цилиндр 1 на две газовые полости: верхнюю Г1 и нижнюю Г3.

Внутри цилиндра 2 установлен гидравлический поршень 3, жестко связанный со штоком 4, снабженным на другом своём конце проушиной 5 для связи с кузовом автомобиля. Шток 4 также жестко связан с цилиндром 1. Места жесткой связи условно показаны крестиками.

Цилиндр 2 жестко связан с нижним штоком 6, на другом конце которого установлена проушина 7 для связи с рычажной системой колеса. Шток 4 способен свободно перемещаться по отношению к цилиндру 2 и в месте контакта с ним установлена уплотнительно-направляющая втулка 14. Шток 6 также способен свободно перемещаться по отношению к цилиндру 1 и в месте контакта с ним установлена уплотнительно-направляющая втулка 15.

Рабочий цилиндр 2 представляет собой типичный гидравлический газонаполненный амортизатор [2] с размещенными внутри него гидравлической и газовой полостями, ограниченными разделительным поршнем 8. Гидравлический поршень 3, снабженный выходящим наружу цилиндра штоком 4 и клапанной системой, разделяет гидравлическую полость на верхнюю Ж1 и нижнюю Ж2 части. Поршень 8 выполняет роль компенсационного устройства для компенсации изменения объема жидкости в полостях Ж1 и Ж2 при перемещении штока 4 внутри цилиндра 2. Газовая полость Г2 представляет собой, таким образом, компенсационную газовую камеру. Поршни 3 и 8 установлены подвижно внутри цилиндра 2 и снабжены уплотнительными манжетами для исключения перетекания жидкости и газа по внешнему боковому контуру поршней 2 и 8.

Клапанная система поршня 3 позволяет перетекать жидкости между полостями Ж1 и Ж2 с определенным сопротивлением, определяемым скоростью перемещения поршня 3 по отношению к цилиндру 2, что обеспечивает требуемую демпфирующую характеристику амортизатора.

Газовые полости Г1 и Г3 снабжены ниппелями 9 и 10 для закачки в эти полости сжатого воздуха. Газовые полости Г1 и Г3 снабжены также предохранительными клапанами 11 и 12, связанными между собой трубопроводом 13. Давление газа в полостях Г1 и Г3 обеспечивает требуемую упругую характеристику амортизатора.

#### Построение упругой характеристики.

При полном ходе амортизатора его длина изменится от  $L_{min}$  до  $L_{max}$ . Тогда объемы газовых полостей Г1 и Г3 ( $V_1$  и  $V_3$ ) и давления в них  $p_1$  и  $p_3$  в функции хода  $S$  штока ( $S = 0 \dots S_{пол}$ ):

$$V_1(S) = F_1 \cdot (S_{зан1} + S), \quad V_3(S) = F_1 \cdot (S_{зан5} + S_{пол} - S),$$

$$p_1(S) = p_{1дсж} \cdot \left( \frac{V_1(S_{дсж})}{V_1(S)} \right)^n, \quad p_3(S) = p_{3дсж} \cdot \left( \frac{V_3(S_{дсж})}{V_3(S)} \right)^n.$$

Теперь можно рассчитать зависимость вертикальной нагрузки на колесо от деформации амортизатора:

$$P(S) = F_1 \cdot [p_1(S) - p_3(S)].$$

Результаты численного моделирования данной зависимости для автомобиля КАМАЗ-43502, выполненные в Mathcad, представлены на рис. 2. Следует отметить, что если статическая нагрузка на амортизатор в снаряженном состоянии  $P_{сн}$  и нагрузка  $P_{дсж}$  динамического хода сжатия  $S_{дсж}$  примерно соответствуют реальным параметрам амортизатора, то нагрузка  $P_{дот}$  существенно отличается от всех, или по крайней мере подавляющего большинства амортизаторов. А именно, является отрицательной, чего ранее в теории амортизаторов не встречалось. Да и часть характеристики амортизатора на участке  $S_{дот}$  имеет изгиб в сторону, противоположную обычной. Это показывает, что шток возвращается в

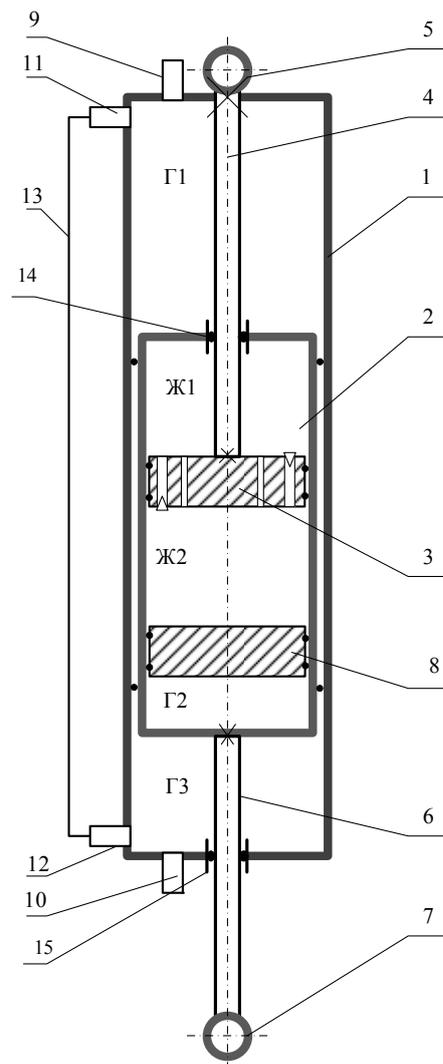


Рис. 1. Конструкция амортизатора

состояние статического равновесия амортизатора с силой, пропорциональной усилию динамического сжатия, причем прогрессивно возрастающей по мере увеличения деформации  $S_{\text{дот}}$ .

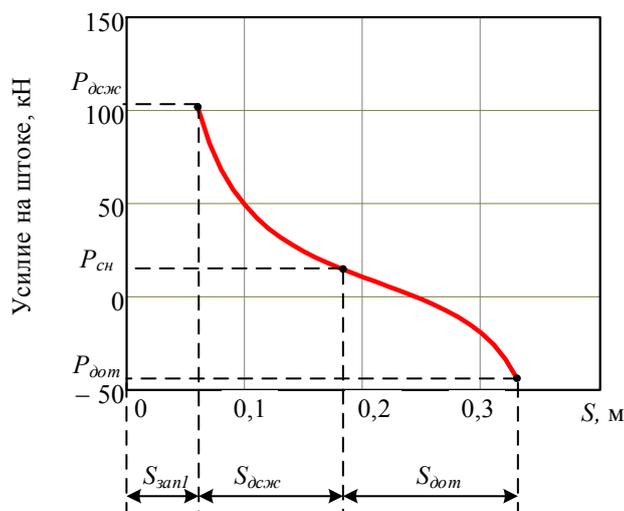


Рис. 2. Результаты моделирования в Mathcad упругой характеристики амортизатора

#### Выводы

Приведенная на рис. 2 зависимость обеспечивает условие непробоя амортизатора на ходе отбоя.

Численное моделирование в Mathcad показывает возможность широкого диапазона регулирования параметров упругой характеристики за счет изменения исходных параметров: диаметра амортизатора, величины запасных ходов внутреннего цилиндра, начального давления в полости ГЗ, значения требуемых усилий и деформаций.

#### Библиографические ссылки

1. Амортизаторы. Конструкция. Расчет. Испытания / В.Н. Добромиров, Е.Н. Гусев, М.А. Карунин, В.П. Хавханов М.: МГТУ «МАМИ», 2006—184 с.
2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. М.: Машиностроение, 1972. 393 с.
3. Акопян Р. А. Пневматическое поддрессирование автотранспортных средств. Львов, Вища школа, 1979. 218 с.
4. Устройство и принцип работы пневмоподвески (<https://techautoport.ru/hodovaya-chast/podveska/pnevmaticheskaya-podveska.html>).
5. Исследование упругой характеристики нового гидропневматического амортизатора / Репин С.В., Добромиров В.Н., Орлов Д.С. // Вестник гражданских инженеров, 2019, 5(76). СПб.: СПбГАСУ. С. 260-269.

#### References

1. Shock absorbers. Design. Calculation. Tests / V.N. Dobromirov, E.N. Gusev, M.A. Karunin, V.P. Khavkhanov M.: MSTU "MAMI", 2006—184 p.
2. Rotenberg R.V. Car suspension. Vibrations and smoothness. M.: Mashinostroenie, 1972. 393 p.
3. Akopyan R. A. Pneumatic suspension of vehicles. Lvov, Vishcha school, 1979. 218 p.
4. The device and principle of operation of the air suspension (<https://techautoport.ru/hodovaya-chast/podveska/pnevmaticheskaya-podveska.html>).
5. Repin S.V., Dobromirov V.N., Orlov D.S. Study of the elastic characteristics of a new hydropneumatic shock absorber. // Bulletin of civil engineers, 2019, 5(76). St. Petersburg: SPbGASU. S. 260-269.

УДК 338

## ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Л. М. Романовская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: Lubarom4@gmail.com

*Мехатроника – идеальная дисциплина для ракетно-космической отрасли, в которой тесно взаимосвязаны простые физические процессы с высокоточными механическими и электронными сложнейшими процессами автоматизации и управления. Немалую роль играет и масса выводимых узлов на орбиту. Мехатроника существует только в симбиозе с электроникой. Без развития микроэлектроники дальнейшее развитие мехатронных систем невозможно.*

*Ключевые слова: мехатроника, электроника, микроэлектроника, развитие, процесс.*

## THE PROBLEM OF IMPORT SUBSTITUTION IN THE FIELD OF MICROELECTRONICS

L. M. Romanovskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Lubarom4@gmail.com

*Mechatronics is an ideal discipline for the rocket and space industry, in which simple physical processes are closely interconnected with highly precise mechanical and electronic complex processes of automation and control. The mass of the nodes launched into orbit also plays a significant role. Mechatronics exists only in symbiosis with electronics. It is impossible to further develop mechatronic systems without the development of electronics.*

*Keywords: mechatronics, electronics, microelectronics, development, process.*

Дальнейшее развитие машиностроения, внедрение новых технологий, целиком зависит от развития мехатроники. Дальнейшее развитие мехатроники от развития электроники, в частности от ширины использования микроэлектроники: электронных миниатюрных компонентов со сверхплотным монтажом.

В настоящий момент из-за существующих санкций возникли проблемы с поставкой в Россию электронных элементов, приборов, чипов и т.д. Возник вопрос импортозамещения. В первую очередь это касается микроэлектроники.

Машиностроительная отрасль России нуждается в переоснащении предприятий. Новое оборудование, новые приборы, датчики и не только – это прежде всего компактные мехатронные узлы в состав которых входит микроэлектроника. Основной задачей микроэлектроники является создание микроминиатюрной аппаратуры с высокой надежностью и воспроизводимостью, низким энергопотреблением и высокой функциональной сложностью. Одним из наиболее важных технологических приемов микроэлектроники является интегральная технология, дающая возможность на одной пластине создавать группы схемно-соединенных между собой элементов [1].

Как многие знают, в стародавние времена, когда еще существовал СССР, последний производил почти всю свою электронную аппаратуру, как бытовую, так и специального назначения, самостоятельно и полностью из своих электронных компонентов. За рубежом (в капстранах) закупались лишь отдельные образцы и то, по большей части, лишь для их изучения и последующего освоения выпуска аналога также полностью на отечественных электронных компонентах и из отечественных материалов. После развала СССР выпуск всей аппаратуры существенно сократился, соответственно и выпуск

компонентов тоже. Но до 2000-х, все же, какая-никакая электронная жизнь теплилась. Даже еще выпускались некоторые виды сложной бытовой аппаратуры – телевизоры и магнитофоны. В 2000-е и 2010-е развал производств и заводов электронной техники не только не прекратился, а еще и многократно ускорился.

Возникла существенная проблема, когда собирать современную электронную технику стало просто не из чего. И тогда, в святая святых, в технику специального назначения стала все шире и шире проникать импортная элементная база. И это логично, ведь лучше делать хоть что-то и хоть как-то, чем не делать ничего. Импортная элементная база очень подкупала своим качеством, ценой, доступностью информации и удобством использования. Со временем все к ней привыкли, и проблемы с отечественной элементной базой вспоминали как страшный сон [2].

На сегодняшний день дела обстоят намного хуже: мы имеем неремонтнопригодную микроэлектронику и отсутствие возможности ее закупать за рубежом. Главные производители – это США и Тайвань. Разберем главные проблемы.

Проблема номер 1: Отсутствие информации. Мы давно уже живем в понимании, что информация стоит денег и часто немалых денег. И если ранее зарубежные производители распространяли каталоги на свою продукцию, то теперь в условиях санкций – это закрытая информация. Все, что касается комплектующих, в частности речь идет о микроэлектронике, информация доступна только самим производителям. Даже сервисным центрам, осуществляющим монтаж и пуско-наладку, информация подается только в части функционирования. Отсюда следует, что нет возможности разрабатывать и изготавливать свои аналоги.

Проблема номер 2: Сложная технология изготовления. Тенденции развития микроэлектроники (интегральных микросхем) связаны, в первую очередь, с необходимостью разработки новых оригинальных полупроводниковых приборов с качественно улучшенными характеристиками. Главные направления исследований в микроэлектронике [3]:

- поиск путей уменьшения размеров элементов интегральных микросхем и соответственно повышение степени интеграции;
- разработка новых эффективных технологий;
- разработка и применение новых материалов при изготовлении интегральных микросхем.

Уровень технологии характеризуется минимальным технологическим размером  $\Delta$  кристалла, плотностью упаковки элементов на кристалле и быстродействием. На сегодняшний день интегральные схемы могут включать в себя до  $10^6$  элементов и это не предел.

Отсутствие ручной сборки. Требуется повышенная влажность. Все это требует специализированного технологического цикла, современного роботизированного оборудования и высококвалифицированных кадров, умеющих работать с программами, создающими цифровых двойников микросхем. Требуется производство литографических сканеров [5].

Проблема номер 3: Нет единого мнения, использовать в качестве подложки кремний или арсенид галлия? Догонять Запад или идти своим путем? Сотрудничать с Китаем, развернув на их площадях наше производство, или нет? Где гарантии, что они нас не кинут? [4]

Проблема номер 5: Где брать инвесторов на сотни миллиардов долларов, чтобы запустить свое производство?

Проблема номер 6: Технологическая отсталость и отсутствие культуры производства приводят к тому, что несмотря на наличие производства у нас сапфировых подложек, добычу редкоземельных элементов, срываются сроки поставки компонентов, а о культуре производства и говорить не приходится, что очень часто приводит к браку тех же микросхем (большие утечки тока). В итоге: деньги на импортозамещение осваиваются, а качественной продукции нет или совсем нет никакой, даже бракованной.

Проблема номер 7: Отсутствие баз повышения квалификации проектантов и технологов усугубляют и так непростую задачу импортозамещения в области микроэлектроники

### Библиографические ссылки

1. Свистова Т. В. Основы микроэлектроники. Учебное пособие. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017, 149 с.
2. Захаров Т. Импортозамещение [Электронный ресурс]. URL: [https://vpk.name/news/570921\\_problemy\\_importozamesheniya\\_elektronnyh\\_komponentov.html](https://vpk.name/news/570921_problemy_importozamesheniya_elektronnyh_komponentov.html) (дата обращения 11.01.2022)

3. Мехатронные технологические системы: концепция проектирования и применение в современном машиностроении [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/5-7019.html> (дата обращения 11.01.2022)
4. Боднар Д. Современные технологии изготовления чипов и сборки в полупроводниковой микроэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. №4. С. 104-112.
5. Секреты производства микросхем: ключевое звено в производстве степпер ASML [Электронный ресурс]. URL: <https://integral-russia.ru/2020/03/10/sekrety-proizvodstva-mikroshem-klyuchevoe-zveno-v-proizvodstve-stepper-asml/> (дата обращения 11.01.2022)

#### References

1. Svistova T. V. Fundamentals of microelectronics. Tutorial. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2017, 149 p.
2. Zakharov T. Import substitution [Electronic resource]. URL: [https://vpk.name/news/570921\\_problemy\\_importozamesheniya\\_elektronnyh\\_komponentov.html](https://vpk.name/news/570921_problemy_importozamesheniya_elektronnyh_komponentov.html) (accessed 01/11/2022)
3. Mechatronic technological systems: design concept and application in modern mechanical engineering [Electronic resource]. URL: <https://helpiks.org/5-7019.html> (Accessed 01/11/2022)
4. Bodnar D. Modern technologies for manufacturing chips and assembly in semiconductor microelectronics // Components and technologies. 2011. No. 4. pp. 104-112.
5. Secrets of the production of microcircuits: the key link in production is the ASML stepper [Electronic resource]. URL: <https://integral-russia.ru/2020/03/10/sekrety-proizvodstva-mikroshem-klyuchevoe-zveno-v-proizvodstve-stepper-asml/> (accessed 11.01.2022)

© Романовская Л. М., 2022

УДК 621.9.047

## **ВИБРАЦИОННОЕ АНОДНО-АБРАЗИВНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

О. А. Суханова, Е. К. Новосельская, 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

*Рассмотрен метод вибрационного анодно-абразивного полирования деталей машин магнитоуправляемыми заряженными частицами, как один перспективных методов полирования поверхности деталей для повышения их эксплуатационных свойств.*

*Ключевые слова: полирование, анодное растворение, абразив.*

## **VIBRATION ANODIC-ABRASIVE POLISHING OF MACHINE PARTS BY MAGNETO CONTROLLED CHARGED PARTICLES**

O. A. Sukhanova, E. K. Novoselskaya, E. V. Patraev, 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 method of vibration anode-abrasive polishing of machine parts by magnetically controlled charged particles is considered as one of the promising methods for polishing the surface of parts to improve their performance properties.*

*Keywords: polishing, anodic dissolution, abrasives*

Актуальным является развитие и поиск перспективных методов полирования поверхности деталей для повышения их эксплуатационных свойств [1]. Одним из таких методов является комбинированный метод анодно-абразивного полирования [1,2].

Вибрационное анодно-абразивное полирование может применяться для снижения шероховатости поверхности криволинейных каналов, каналов малого сечения, а также различных поверхностей деталей машин.

Метод полирования заключается в анодно-абразивной обработке микронеровностей магнито – абразивными электрически поляризованными заряженными частицами, например,  $Fe_3C$  обладающими электроемкостью в проточном электролите, например, в растворе азотно – кислого натрия. При полировании в растворе азотно – кислого натрия на микровыступах и во впадинах образуется оксидная пленка толщиной 0,01-0,1 мм.

Воздействие на микронеровности магнито – абразивных частиц приводит к удалению оксидной пленки с микровыступов и их активации, что способствует их преимущественно анодному растворению электрическим током. Кроме того, абразивные частицы способны срезать микровыступы обрабатываемой поверхности. При вибрационном анодном полировании электрический ток, анодного растворения микровыступов состоит из постоянного тока, передаваемого через электролит путем наложения потенциала (+) на обрабатываемую деталь и (-) на электролит, а также импульсного тока, создаваемого за счет вибрации накладываемой на магнито – абразивные электрически поляризованные заряженные частицы посредством воздействия на них внешнего вибрирующего магнитного поля, при обработке деталей из немагнитных материалов, или на обрабатываемую деталь, изготовленную из магнитных материалов [3], за счет применения вибропривода, создающего вертикально – вращающую вибрацию.

Использование импульсного тока дает возможность увеличить локализацию процесса анодного растворения микровыступов, снизить удаляемый припуск и повысить производительность обработки. Применение магнитоуправляемых электрически поляризованных заряженных частиц позволяет управлять процессом полирования каналов переменного сечения, криволинейных каналов в деталях машин, выполненных из немагнитных материалов, меди, латуни, бронзы и других.

При вибрационном анодно-абразивном полировании деталей машин возможно повышение скорости удаления микровыступов на 10-12 % по сравнению с анодным полированием постоянным электрическим током.

### Библиографические ссылки

1. Исследование процесса отделочной абразивной обработки внутренних поверхностей с применением эффекта вибрационной кавитации / Асаев А. С., Иванайский А. В., Аверин Н. В., Волков Д. И. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2021. № 4(59). С. 57-62.

2. Родионов А.О. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей с щелевыми каналами комбинированной обработкой. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Воронеж, 2014.

3. Пат. 2764538 Российская Федерация, МПК В23 Н5/06. Способ комбинированной обработки каналов сложной формы и устройство для его реализации/ Трифанов И.В., Мелкозеров М.Г., Трифанов В.И. № 2020135953; заявл. 30.10.2020 ; опубл. 18.01.2022, Бюл. № 2. 13 с.

### References

1. Asaev A. S., Ivanajskij A. V., Averin N. V., Volkov D. I. [Study of the process of finishing abrasive treatment of internal surfaces using the effect of vibration cavitation]. Vestnik Ry`binskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solov`eva. 2021, no 4, p.57-62 (In Russ.)

2. Rodionov A.O. *Tekhnologicheskoe obespechenie ehkspluatacionnykh kharakteristik detalej s shchelevymi kanalami kombinirovannoj obrabotkoj*, *Dissertaciya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Technological support of operational characteristics of parts with slotted channels by combined processing. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Voronezh, 2014

3. Trifanov I.V., Melkozerov M.G., Trifanov V.I. *Sposob kombinirovannoj obrabotki kanalov slozhnoj formy` i ustrojstvo dlya ego realizaczii* [A method for combined processing of channels of complex shape and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2764538, 2020.

© Суханова О. А., Новосельская Е. К., Патраев Е. В., Трифанов И. В., 2022

УДК 621.891

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КРУГОВОЙ ПОДАЧИ ПРИ НАРЕЗАНИИ ВИТКОВ ГЛОБОИДНЫХ ЧЕРВЯКОВ

О. А. Суханова, Л. С. Малько

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

*Предложенная модель обеспечивает возможность конструирования устройства к зубофрезерным станкам для позиционирования круговой подачи при нарезании нелинейчатых глобоидных червяков передач, используемых в космическом машиностроении.*

*Ключевые слова: математическая модель, зубофрезерные станки, позиционирование, круговая подача, уравнение кинематического баланса.*

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CIRCULAR FEED POSITIONING PROCESS WHEN CUTTING TURNS OF GLOBOID WORMS

O. A. Sukhanova, L. S. Mal'ko

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

*The proposed model provides the possibility of designing a device for gear milling machines for positioning circular feed when cutting nonlinear globoid worm gears used in space engineering.*

*Keywords: mathematical model, gear milling machines, positioning, circular feed, kinematic balance equation.*

Сокращение затрат на технологическое оборудование при зубонарезании глобоидно-цилиндрической профилно-сопряженной пары с нелинейчатым червяком на основе ротационного течения и повышение ее нагрузочной способности является актуальной задачей для космической, оборонной и других отраслей машиностроения [1].

В настоящее время при зубонарезании глобоидной пары находят применение специальные зубофрезерные станки и плоскостной инструмент в виде резцовых головок и фрез летучек для нарезания витков червяков и зубьев сопряженных колес соответственно [2-4]. Недостаток данной технологии состоит в том, что огибающая зона зуба колеса достигает не более 40 % длины зуба, остальная боковая поверхность зуба не контактирует с витком червяка, так как она подрезана. Из изложенного следует, что профили зубьев колеса имеют значительный резерв по нагрузочной способности. Одним из путей реализации этого резерва является применение универсальных зубофрезерных станков моделей 5К32А, 5К328А и других, снабдив их устройством для позиционирования круговой подачи, вместо используемых в настоящее время специальных зубофрезерных станков моделей 547А, ЕЗ-42С, ЕЗ-57, ЕЗ-96, А47Б, кроме того вместо плоскостных инструментов использовать объемные [5].

При конструировании данного устройства требуется математическая модель процесса позиционирования величины круговой подачи с требуемой точностью.

В качестве исходных данных при разработке модели используется уравнение кинематического баланса участка кинематической цепи зубофрезерного станка, связывающее вращение ведомого вала гитары дифференциала станка и режущего инструмента, а также значение радиуса основной окружности и числа зубьев многолезвийного инструмента.

Математическая связь между числом оборотов  $n_\phi$  многолезвийного инструмента с величиной круговой подачи  $\Delta L$  устанавливается путем соответствующих преобразований выражения вида:

$$\Delta L = \frac{L_\phi - L_n}{2}, \text{ мм} \quad (1)$$

где  $L_\phi$  – фактическое значение длины нормали многолезвийного инструмента;  $L_n$  – номинальное значение длины нормали многолезвийного инструмента.

$$\Delta L = \Delta\phi \cdot r_o, \text{ мм} \quad (2)$$

где  $\Delta\phi$  – угол поворота многолезвийного инструмента, соответствующий величине круговой подачи  $\Delta L$ ;  $r_o$  – радиус основной окружности многолезвийного инструмента.

Математическое выражение, связывающее обороты многолезвийного инструмента с величиной круговой подачи  $\Delta L$ , модулем  $m$  и числом зубьев  $z$  многолезвийного инструмента имеет вид:

$$n_\phi = \frac{\Delta\phi}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 57,296}{\cos 20^\circ \cdot 360^\circ} \cdot \frac{\Delta L}{m \cdot z} = 0,338 \cdot \frac{\Delta L}{m \cdot z}, \text{ об} \quad (3)$$

Математическая связь между числом оборотов ведомого вала дифференциала станка  $n_{в.в.д.}$ , числом зубьев  $z$  и числом оборотов многолезвийного инструмента получают путем преобразования уравнения кинематического баланса цепи зубофрезерного станка 5К32А вида:

$$n_{в.в.д.} = \frac{27}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{58}{58} \cdot \frac{f}{e} \cdot \frac{1}{i_x} \cdot \frac{33}{33} \cdot 96 \cdot n_\phi \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4) получают математическую модель процесса позиционирования круговой подачи при нарезании витков нелинейчатых глобоидных червяков для станка модели 5К32А вида:

$$n_{в.в.д.} = 0,676 \cdot \frac{\Delta L}{m} \quad (5)$$

Объединенная математическая модель процесса позиционирования круговой подачи для зубофрезерных станков имеет вид:

$$n_{в.в.д.} = \frac{k}{m} \cdot \Delta L, \text{ (об)} \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент, присущий конкретной модели станка и определяется из уравнения кинематического баланса участка кинематической цепи конкретной модели станка, связывающего вращение ведомого вала дифференциала и режущего инструмента.

Выражение (5) является математической моделью и используется при конструировании устройств, интегрированных с зубофрезерными станками, для позиционирования круговой подачи при нарезании витков нелинейчатых глобоидных червяков.

Оснащение универсальных зубофрезерных станков данным устройством позволяет без каких-либо технологических трудностей освоить производство прогрессивного вида глобоидно-цилиндрических профильно-сопряженных передач.

#### Библиографические ссылки

1. Сандлер, А.И. Теория и практика производства червячных передач общего вида: учебно-практическое пособие / А.И. Сандлер, С.А. Лагутин, Е.А. Гудов ; под общ. ред. С.А. Лагутина. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. 346 с.

2. Производство зубчатых колес: Справочник / С. Н. Калашников, 1180 А. С. Калашников, Г. И. Коган и др.; Под общ. ред. Б. А. Тайца.- 3-е изд., перераб. и допол.-М.: Машиностроение, 1990.- 464 с.

3. Федотов Б. Ф., Думилин С. В., Щегольков Н. Н., Беляков В. Н. Совершенствование технологии нарезания модифицированных глобоидных передач с локализованным пятном контакта // Известия МГТУ. 2014. №1 (19). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-tehnologii-narezaniya-modifitsirovannyh-globoidnyh-peredach-s-lokalizovannym-pyatnom-kontakta> (дата обращения: 10.04.2021).

4. Гудов Е. А., Лагутин С. А., Федотов Б. Ф. Нагрузочная способность модифицированных глобоидных передач // Вестник НТУ «ХПИ». 2011. № 29. С. 41-52.

5. Суханова О.А., Якубович И.О. Применение универсальных станков 5K32A и 53A80K для нарезания сопряженных профилей глобоидной пары // Актуальные проблемы авиации и космонавтики СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. С. 853-855.

### References

1. Sandler A.I. *Teoriya i praktika proizvodstva chervyachnykh peredach obshchego vida* [Theory and practice of the production of worm gears of a general type]. Vologda, Infra-Engineering, 2016. 346 p.

2. Kalashnikov S. N. *Proizvodstvo zubchatykh koles* [Production of gears]. Mechanical Engineering, 1990. 464 p.

3. Fedotov B. F., Dumilin S. V., Shchegol'kov N. N., Belyakov V. N. *Sovershenstvovanie tekhnologii narezaniya modifitsirovannykh globoidnykh peredach s lokalizovannym pyatnom kontakta* [Improving the technology of cutting modified globoid gears with a localized contact spot]. Izvestia of MSTU. 2014. No. 1 (19).

4. Gudov E. A., Lagutin S. A., Fedotov B. F. *Nagruzochnaya sposobnost' modifitsirovannykh globoidnykh peredach* [Loading capacity of modified globoid gears]. Bulletin of NTU "KhPI". 2011. № 29. Pp. 41-52.

5. Sukhanova O.A., Yakubovich I.O. *Primenenie universal'nykh stankov 5K32A i 53A80K dlya narezaniya sopryazhennykh profiley globoidnoy pary* [The use of universal machines 5K32A and 53A80K for cutting conjugate profiles of a globoid pair]. Krasnoyarsk, 2021. Pp. 853-855.

© Суханова О. А., Малько Л. С., 2022

УДК 621.891

## УСТРОЙСТВО К ЗУБОФРЕЗЕРНОМУ СТАНКУ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КРУГОВОЙ ПОДАЧИ ПРИ НАРЕЗАНИИ ВИТКОВ ГЛОБОИДНЫХ ЧЕРВЯКОВ

О. А. Суханова, Л. С. Малько, Е. 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: olkasukhanova@mail.ru

*Предложенная конструкция устройства обеспечивает возможность использования универсальных зубофрезерных станков для нарезания витков червяков прогрессивных глобоидно-цилиндрических профилльно-сопряженных пар, который могут найти применение в машиностроительных отраслях, в том числе в аэрокосмической.*

*Ключевые слова: круговая подача, устройство для позиционирования, универсальные станки, математическая модель.*

## A DEVICE FOR A GEAR MILLING MACHINE FOR POSITIONING A CIRCULAR FEED WHEN CUTTING TURNS OF GLOBOID WORMS

O. A. Sukhanova, L. S. Mal'ko, E. A. Karelina

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

*The proposed design of the device provides the possibility of using universal gear milling machines for cutting worm coils of progressive globoid-cylindrical profile-conjugate pairs, which can be used in machine-building industries, including aerospace.*

*Keywords: circular feed, positioning device, universal machines, mathematical model.*

Внедрение в производство прогрессивных глобоидно-цилиндрических профилльно-сопряженных пар с нелинейчатыми червяками является актуальной задачей для машиностроительных отраслей, в том числе и аэрокосмической [1].

Практического применения передачи с нелинейчатыми червяками, профили которых очерчены по вогнутой эвольвенте, не нашли по ряду причин, в том числе из-за невозможности использования универсальных зубофрезерных станков для нарезания витков червяка [2].

При использовании универсальных зубофрезерных станков для нарезания витков глобоидных червяков ротационным точением многолезвийным инструментом с эвольвентным профилем по методу обкатки необходимо учитывать тот факт, что чистовое нарезание витков должно производиться с соблюдением постоянного межосевого расстояния осей заготовок глобоидного червяка и режущего инструмента. Для выполнения этого условия требуется применять круговую подачу режущего инструмента. Однако универсальные зубофрезерные станки не имеют соответствующего механизма для позиционирования величины круговой подачи. Поэтому возникает необходимость разработки конструкции устройства, интегрированного со станком, для выполнения этой функции.

На рисунке 1 показана принципиальная схема предлагаемого устройства и его вид по А.

Устройство содержит корпус 1, подвижно соединенный с делительным диском 2 с установленным на нем лимбом 3. На корпусе также установлены два подпружиненных стопора 4 для фиксации делительного диска и кулачек 5 для вывода стопоров из пазов делительного диска.

Устройство работает следующим образом. Делительный диск 2 закрепляется с помощью шпонки на ведомом валу 6 гитары дифференциала, а корпус 1 крепится к корпусу 7 гитары дифференциала. Подпружиненные стопоры 4 западают в пазы делительного диска 2 и не позволяют ему проворачиваться.

ваться. Для того чтобы произвести дополнительный поворот режущего инструмента, закрепленного на рабочем столе станка (выполнить функцию круговой подачи) необходимо поворотом кулачка 5 вывести из паза делительного диска один из стопоров 4. После этого возможен будет поворот делительного диска 2 только в одном направлении, так как второй стопор будет препятствовать его повороту в противоположном направлении. После поворота делительного диска 2 на нужное количество делений, отсчитываемых по лимбу 3, кулачек 5 устанавливается в нейтральное положение и стопор 4 снова западет в паз делительного диска и окончательно фиксируется в заданном положении.

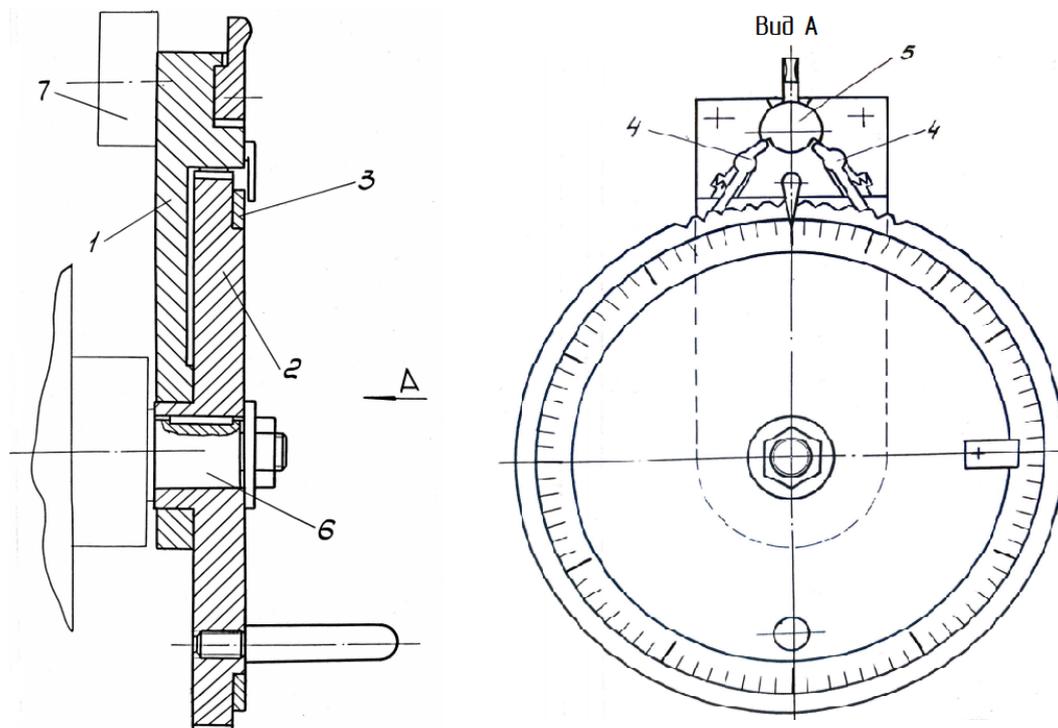


Рис. 1. Принципиальная схема устройства и его вид А:

1 – корпус; 2 – делительный диск; 3 – лимб; 4 – подпружиненные стопоры; 5 – кулачек; 6 – ведомый вал дифференциала станка; 7 – корпус гитары дифференциала; 8 – рукоятка

На лимбе 3 устройства наносится 180 делений. Цена одного деления равно  $2^\circ$ . Устройство снабжено таблицей, где указывается зависимость числа оборотов ведомого вала дифференциала в градусах от требуемой величины круговой подачи и модуля нарезанного червяка.

В основу этой зависимости положена математическая модель вида [3]:

$$n_{\text{в.в.д.}} = \frac{k}{m} \cdot S_{\text{кр}}, \quad (\text{об}), \quad (1)$$

где  $S_{\text{кр}}$  – значение круговой подачи.

Окончательное выражение для расчета числа оборотов ведомого вала в градусах имеет вид

$$n_{\text{в.в.д.}} = \frac{k}{m} \cdot S_{\text{кр}} \cdot 360^\circ.$$

Таким образом, использование предлагаемого устройства позволяет без особых технологических трудностей обеспечить изготовление глобоидных пар с максимальными радиусами приведенной кривизны активных поверхностей при выполнении профиля витка червяка очерченного по вогнутой эвольвенте, а профиля зуба колеса – по выпуклой эвольвенте. Как отмечено в работах [2, 4] глобоидные передачи с таким видом зацепления в настоящее время не могут быть изготовлены из-за ряда технологических трудностей, в том числе из-за невозможности использования универсальных зубофрезерных станков для нарезания витков червяка.

### Библиографические ссылки

6. Сандлер, А.И. Теория и практика производства червячных передач общего вида: учебно-практическое пособие / А.И. Сандлер, С.А. Лагутин, Е.А. Гудов ; под общ. ред. С.А. Лагутина. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. 346 с.
7. Сандлер, А.И.. Производство червячных передач / А. И. Сандлер, С. А. Лагутин, А. В. Верховский ; под общ. ред. С. А. Лагутина. Москва : Машиностроение, 2008. 272 с.
8. Суханова О.А., Якубович И.О. Применение универсальных станков 5К32А и 53А80К для нарезания сопряженных профилей глобоидной пары // Актуальные проблемы авиации и космонавтики СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. С. 853-855.
9. Гудов Е. А., Лагутин С. А., Федотов Б. Ф. Нагрузочная способность модифицированных глобоидных передач // Вестник НТУ «ХПИ». 2011. № 29. С. 41-52.

### References

6. Sandler A.I. *Teoriya i praktika proizvodstva chervyachnykh peredach obshchego vida* [Theory and practice of the production of worm gears of a general type]. Vologda, Infra-Engineering, 2016. 346 p.
7. Sandler A. I., Lagutin S. A., Verkhovskiy A. V. *Proizvodstvo chervyachnykh peredach* [Production of worm gears]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 271 p.
8. Sukhanova O.A., Yakubovich I.O. *Primenenie universal'nykh stankov 5K32A i 53A80K dlya narezaniya sopryazhennykh profiley globoidnoy pary* [The use of universal machines 5K32A and 53A80K for cutting conjugate profiles of a globoid pair]. Krasnoyarsk, 2021. Pp. 853-855.
9. Gudov E. A., Lagutin S. A., Fedotov B. F. *Nagruzochnaya sposobnost' modifitsirovannykh globoidnykh peredach* [Loading capacity of modified globoid gears]. Bulletin of NTU "KhPI". 2011. № 29. Pp. 41-52.

© Суханова О. А., Малько Л. С., Карелина Е. А., 2022

УДК 621.044.2+539.26

## ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТА Cu-Mo

П. О. Шалаев<sup>1</sup>, Л. И. Квеглис<sup>1</sup>, Ф. М. Носков<sup>1</sup>, В. П. Жереб<sup>1,2\*</sup>, К. М. Эренчин<sup>1</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: vpzhereb@rambler.ru

*Исследованы структурные и морфологические изменения слоистого композита Cu-Mo после ударно-волнового нагружения (УВН). Обнаружены изменения кристаллической структуры и морфологии фаз, которые являются диссипативными структурами, формирующиеся в композите в условиях сильного удаления от равновесия.*

*Ключевые слова: слоистый композит Cu-Mo, ударно-волновое нагружение, структурные и морфологические изменения.*

## INFLUENCE OF SHOCK-WAVE LOADING ON THE STATE OF THE Cu-Mo COMPOSITE

P. O. Shalaev<sup>1</sup>, L. I. Kveglis<sup>1</sup>, F. M. Noskov<sup>1</sup>, V. P. Zhereb<sup>1,2\*</sup>, K. M. Erenchin<sup>1</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: vpzhereb@rambler.ru

*Structural and morphological changes in the Cu-Mo layered composite after shock-wave loading (SWL) have been studied. Changes in the crystal structure and phase morphology are found, which are dissipative structures that form in the composite under conditions of a strong distance from equilibrium.*

*Keywords: Cu-Mo layered composite, shock-wave loading, structural and morphological changes.*

**Введение.** Высокая плотность, хорошая тепло- и электропроводность, низкий коэффициент термического расширения обеспечивают широкое использование композиционных наполненных материалов и пленочных композиционных покрытий системы медь – молибден в электрических контактах, а также различных электронных устройствах [1-3]. Реализация указанных свойств в массивных слоистых композитах как конструкционных материалах, открывает новые перспективные направления их использования, в том числе в аэрокосмической отрасли. Однако, получение устойчивых компактов Cu-Mo ограничивается практически полным отсутствием твердых растворов компонентов и их расслаиванием в жидком состоянии. В [4, 5] было показано, что технологические перспективы имеют только неравновесные методы синтеза – различные варианты ударно-волнового нагружения или механохимический синтез.

**Образцы и методы исследования.** Образцы композиционного материала (КМ) получены сваркой взрывом многослойного пакета пластин технической меди (марка М1) толщиной 0,3 мм и пластин молибдена (марка МЧ) толщиной 0,5 мм. Пакет из чередующихся 7 медных и 7 молибденовых пластин сваривали взрывом одним зарядом взрывчатого вещества аммонита 6ЖВ по методике, описанной в работе [6].

Цель настоящей работы состояла в исследовании характера структурных и фазовых превращений, которые протекают при совместной пластической деформации пластин меди и молибдена в условиях УВН.

**Результаты.** В представленной работе исследовали продукты твердофазных реакций, возникающие при взаимодействии двух компонентов – меди и молибдена при формировании слоистого композиционного материала под давлением (сварка взрывом). Актуальность такого исследования обусловлена полной взаимной нерастворимостью меди и молибдена друг в друге в равновесных условиях. Неравновесные условия получения образцов могут стать причиной возникновения новых неисследованных фаз в системе медь-молибден.

На рис. 1 показана структура композиционного материала медь–молибден полученного сваркой взрывом. В центре рис. 1, *а* расположен слой меди, сверху и снизу – слои молибдена. Хорошо выражена зона контакта, которая имеет волнистую форму, типичную для этого типа сварки.

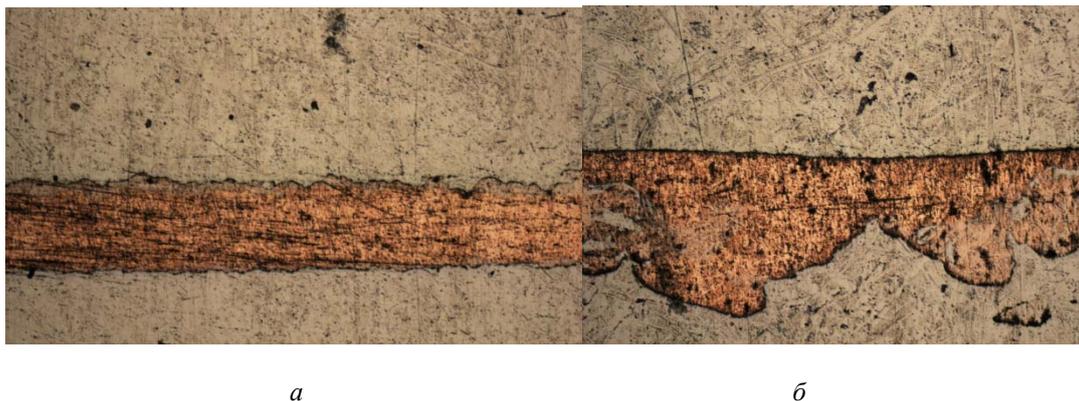


Рис. 1. Структура образца в зоне соединения молибдена и меди после сварки взрывом: *а* – нормальное взаимодействие компонентов×75; *б* – активное взаимодействие

Установлено, что в процессе прохождения пластической деформации образовались структуры по типу твёрдых растворов в зоне контакта компонентов, на глубине порядка 10 мкм. С помощью рентгенофазового анализа были обнаружены твёрдые растворы на основе как меди, так и молибдена, причём среди выявленных твёрдых растворов обнаружены как неупорядоченные твёрдые растворы, так и атомно упорядоченные (сверхструктурные) твёрдые растворы. Таким образом, неравновесные условия получения композиционного материала инициировали возникновение неравновесных фаз – твёрдых растворов, которые отсутствуют на диаграмме равновесных фазовых состояний.

Общий характер изменений кристаллической структуры составляющих и их морфологии в КМ позволяет утверждать, что УВН сопровождается формированием в системе медь – молибден состояний, обеспечивающих возможность максимального рассеяния подведенной энергии и формирование морфологии фаз, аналогичных эвтектической композиции, т.е. таким диссипативным структурам, которые обеспечивают наибольшую устойчивость системы вдали от равновесия.

#### **Выводы.**

1. Исследованы продукты твердофазных реакций, возникающие при взаимодействии двух практически нерастворимых компонентов – меди и молибдена в условиях ударно-волнового нагружения.

2. Неравновесные условия получения композиционного материала медь-молибден инициировали возникновение неравновесных фаз – твёрдых растворов, которые отсутствуют на диаграмме равновесных фазовых состояний

3. При расшифровке картин дифракции рентгеновских лучей, полученных с зоны контакта меди и молибдена обнаружены твёрдые растворы на основе как меди, так и молибдена, причём среди выявленных твёрдых растворов обнаружены как неупорядоченные твёрдые растворы, так и атомно упорядоченные (сверхструктурные) твёрдые растворы.

4. Показатели микротвердости компонентов как меди, так и молибдена увеличились в зоне их соединения друг с другом. Это можно связать как с наклёпом, вызванным пластической деформацией при сварке под давлением, так и с твердорастворным и дисперсионным упрочнением.

### Библиографические ссылки

1. Yih P., Chung D. D. L. Copper-Matrix Molybdenum Particle Composite as a Low-Thermal-Expansion Conductor // MRS Proceedings, 1993. P. 323.
2. Мали В. И., Калинин А. Н., Сергеев С. А. Исследование теплопроводности взрывных компактов медь молибден // Физика горения и взрыва, 2003. Т. 39. № 1. С. 123-127.
3. Patel A. N., Diamond S. The effects of non-equilibrium processing in the development of copper alloys // Materials Science and Engineering, 1988. Vol. 98. P. 329–334.
4. Study on the solid solubility extension of Mo in Cu by mechanical alloying Cu with amorphous Cr(Mo) / Xi S., Zuo K., Li X. et al. // Acta Materialia, 2008. Vol. 56. No 20. P. 6050-6060
5. Fabrication of functionally graded W(Mo)–Cu composites by explosive consolidation / Yang G. L., Yu Q., Feng D. K. et al. // Materials Research Innovations, 2015. Vol. 19(sup1). S1–45–S1–49.
6. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites / Mali V. I., Pavliukova D. V., Bataev I. A. et al. // Advanced Materials Research, 2011. Vol. 311-313. P. 236-239.

### References

1. Yih P., Chung D. D. L. Copper-Matrix Molybdenum Particle Composite as a Low-Thermal-Expansion Conductor // MRS Proceedings, 1993. P. 323.
2. Mali V. I., Kalinin A. N., Sergeev S. A. Issledovanie teploprovodnosti vsryvnyh kompaktov med' molibden // Fizika gorenija i vzryva, [Investigation of the thermal conductivity of explosive copper-molybdenum compacts // Physics of Combustion and Explosion] 2003. T. 39. № 1. С. 123-127.
3. Patel A. N., Diamond S. The effects of non-equilibrium processing in the development of copper alloys // Materials Science and Engineering, 1988. Vol. 98. P. 329–334.
4. Study on the solid solubility extension of Mo in Cu by mechanical alloying Cu with amorphous Cr(Mo) / Xi S., Zuo K., Li X. et al. // Acta Materialia, 2008. Vol. 56. No 20. P. 6050-6060
5. Fabrication of functionally graded W(Mo)–Cu composites by explosive consolidation / Yang G. L., Yu Q., Feng D. K. et al. // Materials Research Innovations, 2015. Vol. 19(sup1). S1–45–S1–49.
6. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites / Mali V. I., Pavliukova D. V., Bataev I. A. et al. // Advanced Materials Research, 2011. Vol. 311-313. P. 236-239.

© Шалаев П. О., Квеглис Л. И., Носков Ф. М., Жереб В. П., Эренчин К. М., 2022

УДК 004.932.2

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПОДХОДА СХВАТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА НА ОСНОВАНИИ ПОТОКОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Я. Е. Шумилина\*, А. О. Панаськов

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

*В данной работе приведен алгоритм определения объектов интереса на потоковом изображении, расстояния до объектов для получения вектора подхода схвата манипулятора, а также проведена оценка точности расстояния, измеренного стереокамерой.*

*Ключевые слова: OpenCV, алгоритм, техническое зрение, стереокамера, карта глубины, определение объектов интереса.*

## ADAPTIVE GRIPPER APPROACH ALGORITHM AND DETERMINATION OF THE DISTANCE TO THE OBJECT BASED ON THE STREAMING IMAGE

Y. E. Shumilina, A. O. Panaskov

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

*This paper presents an algorithm for determining objects of interest on a streaming image, the distance to objects to obtain the approach vector of the manipulator gripper, and also assesses the accuracy of the distance measured by a stereo camera.*

*Keywords: OpenCV, algorithm, technical vision, stereo camera, depth map, detection of objects of interest.*

Для осуществления межпланетных космических миссий требуются различные манипуляторы с высокой степенью автономности. В случае исследования планеты находящейся далеко от нашей планеты возникает проблема передачи информации, следовательно необходимо обеспечить автономное выполнение задач манипулятором [1]. Для упрощения дистанционной работы предполагается использование адаптивных алгоритмов.

В общем случае при работе с объектами необходимо определить объект, найти точки в пространстве для взаимодействия, захватить объект и провести необходимые манипуляции.

Так как расстояние до предмета заранее неизвестна, необходимо с помощью камеры глубины определить расстояние до объекта. В данной работе таким объектом будет куб со стороной 40 мм.

Для нахождения куба воспользуемся алгоритмом, описанным в статье [2]. Так как адаптивность робота подразумевает работу в реальном времени, а также для упрощения задачи нахождения глубины, будем в качестве стереокамеры использовать Intel Realsense D435i.

Алгоритм нахождения расстояния от камеры до объекта интереса.

1. Определение камеры;
2. Получение информации о камере для настройки разрешения;
3. Получение кадра глубины и цветного изображения;
4. Выравнивание изображений цветного и глубины;
5. Нахождение объектов интереса в области [3];
6. Соотношение пикселя центра объекта интереса к карте глубин;
7. Вывод полученной информации о глубине на цветное изображение [4].

Результат работы алгоритма приведен на рис. 1.

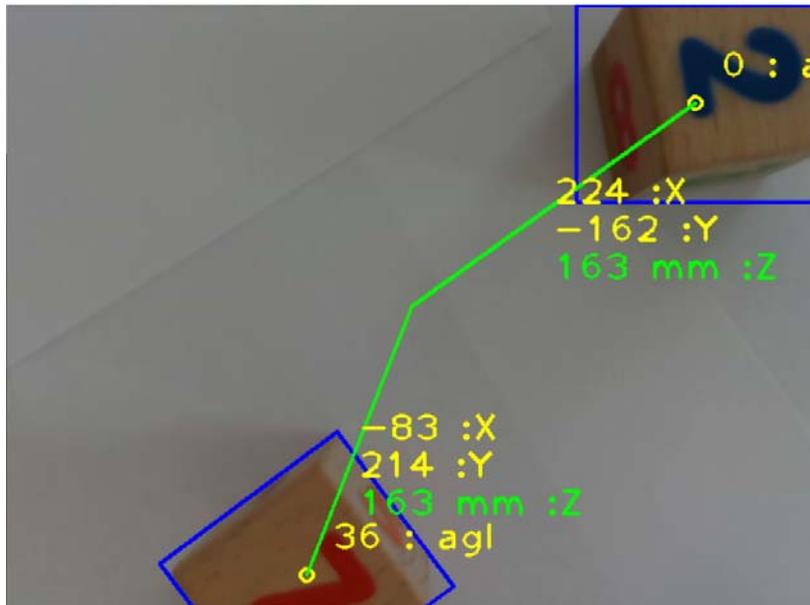


Рис. 1. Определение объектов и расстояния до них на потоковом изображении

Зная высоту объекта и расстояние от камеры до его верхней грани, а также расположение камеры относительно манипулятора, можем найти вектор подхода схвата манипулятора. Однако особой интерес вызывает величина ошибки определения расстояния при помощи данной стереокамеры и разработанного алгоритма. Для этого было проведены замеры расстояния при следующих условиях:

1. Расстояние от камеры до стола составляет 200 мм;
2. Куб со стороной 40 мм.

Замеры проведенного эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты измерений**

		Номер измерения									
Кубик		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2		163	163	164	164	163	165	165	164	163	165
7		163	163	164	163	164	165	164	165	165	163

Зная результаты измерений, определим среднее арифметическое результатов измерений и средне-квадратичное отклонение среднего арифметического по следующим формулам [5]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Осталось определить доверительные границы по следующей формуле:

$$(P) = \pm t \cdot S_{\bar{x}};$$

$$(P) = \pm 0,5075 \text{ мм.}$$

Абсолютная погрешность составляет:

$$\Delta = 163,9 \pm 0,5075 - 160 = 3,9 \pm 0,5075 .$$

Следовательно максимальная относительная погрешность составит 2,7547% для расстояния 160-200 мм. Однако была замечена систематическая ошибка, которая ухудшает результат измерений для её учета необходимо доработать алгоритм определения расстояния до объекта, что позволит уменьшить абсолютную и относительную погрешность измерений стереокамерой.

### Библиографические ссылки

1. Meet ISAAC, Integrating Robots with the Space Stations of the future. URL: <https://www.nasa.gov/feature/ames/meet-isaac> (дата обращения: 05.09.2022).
2. Шумилина Я. Е., Панаськов А. О. Алгоритм подхода схвата на основании изображения объекта // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: докл. сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (11-15 апреля 2022 г., г. Красноярск)
3. Howse J., Minichino J. Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3. UK, Birmingham: Packt Publishing, 2020. 352 p.
4. Визильтер Ю. В. и др. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2016. 464 с.
5. Ефимова А. И., Зотеев А. В., Склянкин А. А. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: Учебно-методическое пособие. М.: МГУ, Физический факультет, 2012. 39 с.

### References

1. Meet ISAAC, Integrating Robots with the Space Stations of the future. URL: <https://www.nasa.gov/feature/ames/meet-isaac> (accessed 05.09.2022).
2. Shumilina Ya. E., Panas'kov A. O. [Grasp approach algorithm based on object image] Materials VIII Intern. Scientific. Conf. "Actual problems of aviation and astronautics". 2022. (In Russ.).
3. Howse J., Minichino J. [Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3]. UK, Birmingham, Packt Publishing, 2020. 352 p.
4. Vizilter Yu. V. Obrabotka i analiz tsifrovyykh izobrazheniy s primerami na LabVIEW i IMAQ Vision. [Processing and analysis of digital images with examples on LabVIEW and IMAQ Vision]. M.: DMK Press, 2016, 464 p.
5. Efimova A. I., Zoteev A. V., Sklyankin A. A. Obshchiy fizicheskiy praktikum fizicheskogo fakul'teta MGU. Pogreshnosti eksperimenta [General physical workshop of the Faculty of Physics of Moscow State University. Experimental errors]. Moscow, MGU, 2012, 39 p.

© Шумилина Я. Е., Панаськов А. О., 2022

УДК 621.713.3

## ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЛАДКИХ КАЛИБРОВ

А. С. Щербина\*, А. Е. Ткачёва, В. О. Потапова, Е. В. Щербина, 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: alessechka@mail.ru

*Произведен сравнительный анализ средств измерений для контроля гладких калибров. Правильный выбор средств измерений позволяет повысить уровень точности изделий ракетостроительного комплекса.*

*Ключевые слова: средство измерения, гладкий калибр, контроль калибров.*

## SELECTION OF MEASURING INSTRUMENTS FOR THE CONTROL OF SMOOTH GAUGES

A. S. Shcherbina\*, A. E. Tkacheva, V. O. Potapova, E. V. Shcherbina, E. A. Zhirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: alessechka@mail.ru

*A comparative analysis of measuring instruments for the control of smooth calibers was carried out. The correct choice of measuring instruments makes it possible to increase the level of accuracy of rocket-building complex products.*

*Keywords: measuring instrument, smooth gauge, gauge control.*

В настоящее время основной деятельностью оборонной промышленности Российской Федерации является производство ракетно-космической техники, для контроля качества которой применяются средства допускового контроля, в частности гладкие калибры.

Калибры – это бесшкальные измерительные инструменты, предназначенные для контроля размеров элементов деталей, их геометрической формы и взаимного расположения [1].

Контроль гладких калибров проводится на основании рекомендации МИ 1927-88 «Калибры гладкие для цилиндрических валов и отверстий методика контроля» [2]. Для выбора средств измерений при контроле гладких цилиндрических калибров необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ всех этапов контроля гладких цилиндрических калибров и средств измерений, применяемых при контроле в соответствии с МИ 1927-88.

2. Проанализировать требуемую точность средств измерений в соответствии с МИ 1927-88 и выбрать аналогичные современные приборы, обеспечивающие необходимую точность и снижающие трудоемкость измерения.

В ходе работы проведен анализ точности средств измерений, которые применяются при контроле гладких цилиндрических калибров [3,4]. В таблице 1 представлены приборы, указанные в соответствии с рекомендациями МИ 1927-88 и предложены аналогичные по точности современные приборы.

Средства измерения, представленные в МИ 1927-88 требуют высокой квалификации и внимательности контролёра, а также больших временных затрат. При использовании современных аналогичных по точности приборов процесс контроля гладких калибров станет проще и быстрее, уменьшается трудоемкость измерения.

## Сравнительный анализ средств измерений для контроля гладких калибров

Этап контроля	Приборы по МИ1927-88	Современные приборы, аналогичные по точности
Определение шероховатости поверхности калибров	Профилограф-профилометр типа А по ГОСТ 19299-73 и ГОСТ 19300-73. Образцы шероховатости поверхности (сравнения) ГОСТ 9378-75. Образцы деталей с параметрами шероховатости калибров по ГОСТ 2015-84 и ГОСТ 2216-84 с отклонением среднего значения Ra от номинального $-17^{+12} \%$	MarSurf M 300 C SET/M 300 SET, портативный прибор для измерения шероховатости
Определение размеров калибров – для отверстий (Рабочие калибры-пробки 6-го качества)	Головка измерительная типа 1 ИГ по ГОСТ 18833-73 Головка измерительная типа 05 ИПМ по ГОСТ 14712-79	МИКРОН-04. Головки измерительные электронные типа ИГПЦ и ИПМЦ
	Оптиметры типа ИКГ-3	Горизонтальный длинномер DMS 680. Универсальный горизонтальный длинномер LMI 680 PC EX EKM Jena (Германия). Горизонтальный прибор измерения длины ETALON POLO
Определение отклонения формы калибров-пробок	Кругломеры не грубее 2-го класса точности по ГОСТ 17353-80	Кругломер MMQ 400 (ф. Maht Германия)
	Головка измерительная пружинная 05 ИГП по ГОСТ 6933-81. Стойка для измерительных головок С-1 по ГОСТ 10197-70. Призма поверочная по ГОСТ 5641-82	МИКРОН-04. Головки измерительные электронные типа ИГПЦ и ИПМЦ
	Оптиметр горизонтальный типа ИКГ-3 Плоскопараллельные концевые меры длины 2 – 3-го классов точности по ГОСТ 9038-83 или 4 – 5-го разрядов по ГОСТ 8.166-75	Горизонтальный длинномер DMS 680. Универсальный горизонтальный длинномер LMI 680 PC EX EKM Jena (Германия). Горизонтальный прибор измерения длины ETALON POLO
Проверка нерегулируемых калибров-скоб;	Оптиметр горизонтальный типа ИКГ-3.	Универсальный горизонтальный длинномер LMI 680 PC EX EKM Jena (Германия). Горизонтальный прибор измерения длины ETALON POLO
Проверка и установка на размер регулируемых калибров-скоб	Измерительная машина по ГОСТ 10875-76 (ИЗМ-1) Длинномер горизонтальный типа ИКУ-2; ИЗГ5. Плоскопараллельные концевые меры длины 2 – 3-го классов точности по ГОСТ 9038-83 или 4 – 5-го разрядов по ГОСТ 8.166-75. Калибры-пробки контрольные по ГОСТ 24853-81	Универсальный горизонтальный длинномер LMI 680 PC EX EKM Jena (Германия). Горизонтальный прибор измерения длины ETALON POLO

Применение современных средств измерения при контроле гладких калибров позволяет не только обеспечить высокую точность и качество работ, но и способствует изготовлению высокоточных и качественных изделий ракетостроительного комплекса.

**Библиографические ссылки**

1. ГОСТ 27284-87. КАЛИБРЫ. Термины и определения. [Текст]. Введ. 1988-01-01. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.04.87 N 1269.
2. МИ 1927-88. Рекомендация. Калибры гладкие для цилиндрических валов и отверстий. Методика контроля. [Текст]. Введ. 1989-02-01. Государственным комитетом СССР по стандартам (1989 г.).
3. Щербина, А.С., Ткачёва, А.Е., Потапова, В.О., Щербина, Е.В. Совершенствование методики контроля гладких калибров-скоб и калибров-пробок [Текст]: РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ / Щербина, А.С. Красноярск 2021. 2 с.
4. Щербина, А.С. Совершенствование контроля гладких калибров. [Текст]: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКИ / Щербина, А.С. Красноярск, 2021. 3 с.

**References**

1. GOST 27284-87. CALIBERS. Terms and definitions. [Text]. Introduced 1988-01-01. By the Resolution of the State Committee of the USSR on Standards of 16.04.87 N 1269.
2. MI 1927-88. Recommendation. The gauges are smooth for cylindrical shafts and holes. The method of control. [Text]. Introduced on 1989-02-01 by the USSR State Committee on Standards (1989).
3. Shcherbina, A.S., Tkacheva, A.E., Potapova, V.O., Shcherbina, E.V. Improvement of methods of control of smooth gauge-brackets and gauge-plugs [Text]: RESHETNEV READINGS / Shcherbina, A.S. Krasnoyarsk 2021. 2 p.
4. Shcherbina, A.S. Improving the control of smooth calibers. [Text]: ACTUAL PROBLEMS OF AVIATION AND COSMONAUTICS / Shcherbina, A.S. Krasnoyarsk, 2021. 3 p.

© Щербина А. С., Ткачёва А. Е., Потапова В. О., Щербина Е. В., Жирнова Е. А., 2022

УДК 620.18

## ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Е. В. Щербина<sup>1\*</sup>, А. С. Щербина<sup>1</sup>, А. Е. Ткачёва<sup>1</sup>, В. О. Потапова<sup>1</sup>, А. А. Снежко<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>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России  
Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1

\*E-mail: shamatrina\_@mail.ru

*Предложено решение проблем контроля сварных соединений деталей сложной конфигурации. Использование предложенного оборудования при металлографическом контроле сварных швов повысит точность и качество работ.*

*Ключевые слова: сварное соединение, металлографический контроль, метод контроля, структура металла*

## PROBLEMS OF QUALITY CONTROL OF WELDED JOINTS OF COMPLEX CONFIGURATION PARTS AND METHODS FOR THEIR ELIMINATION

E. V. Shcherbina<sup>1\*</sup>, A. S. Shcherbina<sup>1</sup>, A. E. Tkacheva<sup>1</sup>, V. O. Potapova<sup>1</sup>, A. A. Snezhko<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>Siberian Fire and Rescue Academy  
1, North st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation

\*E-mail: shamatrina\_@mail.ru

*A solution to the problems of control of welded joints of parts of complex configuration is proposed. The use of the proposed equipment for metallographic inspection of welds in rocket science will increase the accuracy and quality of work.*

*Keywords: welded joint, metallographic control, control method, metal structure.*

Контроль качества металлоконструкций на всех этапах производства – гарантия надежности и безопасности готовых изделий.

Современные технологические процессы изготовления продукции в большинстве случаев сопровождаются использованием различных способов сварки. Совершенствование существующих или создание новых способов сварки только частично решает проблему повышения качества изготавливаемых конструкций, так как даже при хорошо отработанной технологии выполнения соединения возможно возникновение различного рода дефектов, приводящих к снижению их надежности и долговечности. Следовательно, для повышения качества изготавливаемых конструкций важное значение имеют методы контроля [1].

Выбор метода контроля, применяемого для проверки качества сварного соединения, зависит от вида и формы сварной конструкции, а также от тех требований, которые предъявляются к данному типу конструкции.

В массовом и серийном производствах деталей сложной конфигурации наиболее распространен металлографический контроль качества сварных соединений.

Основным средством контроля при металлографическом исследовании металлов являются микроскопы.

Важной задачей металлографических исследований являются установление структуры металла и качества сварного соединения, выявление наличия и характера дефектов [2]. Металлографические исследования включают в себя макро- и микроструктурный методы анализа металлов.

При макроструктурном методе изучают макрошлифы и изломы металла невооруженным глазом или с помощью лупы. Макроисследование позволяет определить характер и расположение видимых дефектов в разных зонах сварных соединений (рис.1).

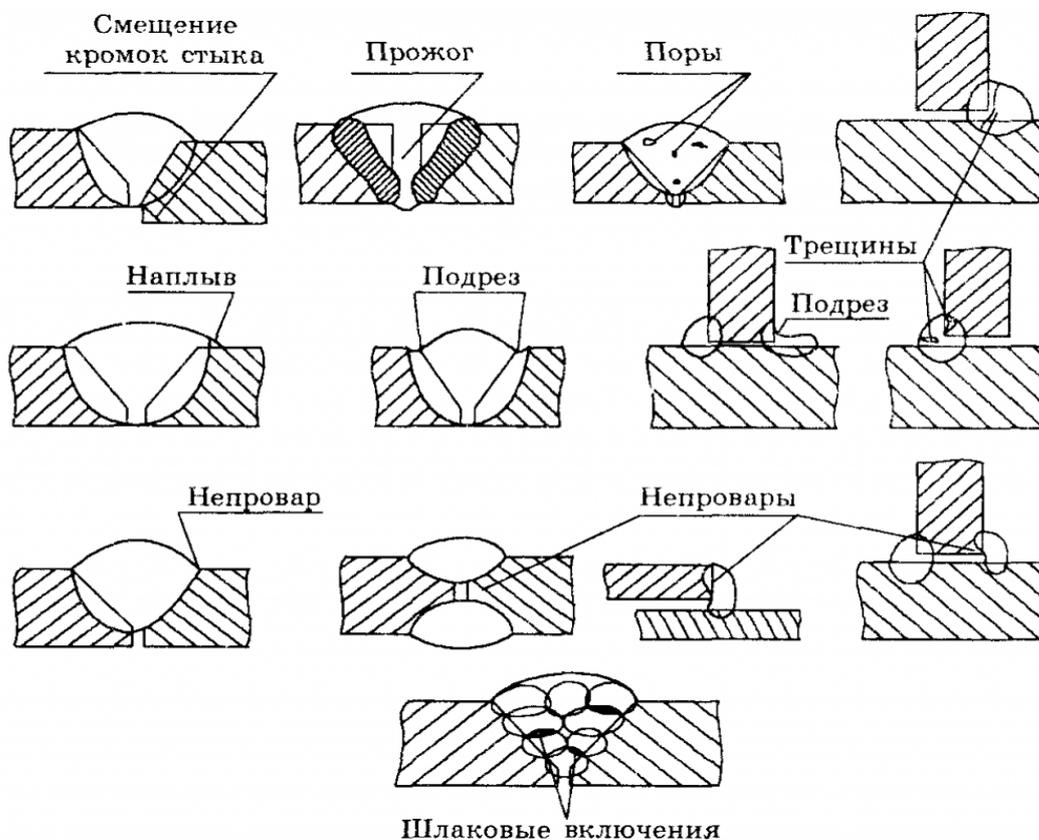


Рис. 1. Дефекты, характерные для сварных соединений

При микроструктурном анализе исследуется структура металла при увеличении в 50 – 2000 раз с помощью оптических микроскопов. Микроисследование позволяет установить качество металла, в том числе обнаружить пережог металла, наличие оксидов, засоренность металла шва неметаллическими включениями, величину зерен металла, микроскопические трещины, поры и некоторые другие дефекты структуры.

Основным недостатком металлографии является длительность данного метода, а также значительная трудоемкость.

Совершенствование методики металлографического контроля сварных швов основывается на применении современного оборудования, снижающего трудоемкость процесса и повышающих точность.

По усовершенствованной методике контроля макроструктурный анализ сварных соединений можно произвести с помощью стереомикроскопа ZEISS Stemi 508. Технические характеристики: максимальный диапазон общего увеличения  $2x \dots 250,0x$ ; максимальное рабочее расстояние 286 мм; система регистрации изображения – цветная или монохромная цифровая камера, фотоаппарат [3].

Для микроструктурного анализа сварных соединений рекомендуется использовать инвертированный металлографический микроскоп Nikon ECLIPSE MA200. Увеличение  $50X \div 2000X$ ; энергопотребление 1,2А 50/60 Гц; вес 26кг; оптика CFI60; встроенный, 8,4-дюймовый ЖК-экран XGA позволяет просматривать образец без необходимости смотреть в окуляры. Простое сохранение / печать данных [4].

Применение предложенного оборудования при контроле сварных швов деталей сложной конфигурации повышает точность и качество работ.

### Библиографические ссылки

1. Овчинников, В. В. Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений / В. В. Овчинников. 3. Москва : Издательский центр "Академия", 2017. 224 с. [Текст].
2. Шторм [Электронный ресурс]. URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/defekty-i-kontrol-kachestva-svarnykh-soedineniy/> (дата обращения: 15.08.2022).
3. Щербина, Е.В., Снежко, А.А., Карелина, Е.А. Совершенствование методики металлографического контроля сварных соединений [Текст]: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ/ Щербина, Е.В. Новосибирск 2021. 3 с.
4. Nikon Metrology Europe NV [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nikonmetrology.com/> (дата обращения: 16.08.2022).

### References

5. Ovchinnikov, V. V. Detection of welded joints and quality control of welded joints / V. V. Ovchinnikov. 3. Moscow: Publishing Center "Academy", 2017. 224 p. [Text].
6. Storm [Electronic resource]. URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/defekty-i-kontrol-kachestva-svarnykh-soedineniy/> (date of access: 08/15/2022).
7. Shcherbina, E.V., Snezhko, A.A., Karelina, E.A. Improving the methods of metallographic inspection of welded joints [Text]: SCIENCE. TECHNOLOGY. INNOVATIONS / Shcherbina, E.V. Novosibirsk 2021. 3 p.
8. Nikon Metrology Europe NV [Electronic resource]. URL: <https://www.nikonmetrology.com/> (date of access: 08/16/2022).

© Щербина Е. В., Щербина А. С., Ткачева А. Е., Потапова В. О., Снежко А. А., 2022

УДК 669.1+546.62+546.882

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Ti-Nb

О. В. Юшкова (Белоногова)<sup>1,\*</sup>, А. И. Безруких<sup>1</sup>, В. П. Жереб<sup>1,2</sup>, Н. Е. Степаненко<sup>1</sup>, А. С. Сапарова<sup>1</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: Olga\_Yushkova\_1954@mail.ru

*Исследована модифицирующая способность сплавов Al-Ti-Nb. С помощью растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа обнаружены частицы  $Al_3Nb$ . По результатам Alcan-теста предложен оптимальный состав модификатора для алюминия марки А85.*

*Ключевые слова: сплавы системы Al-Ti-Nb, модифицирование микроструктуры алюминия А85, интерметаллид  $Al_3Nb$ .*

## STUDY OF THE MODIFYING ABILITY OF ALUMINUM ALLOYS OF THE Al-Ti-Nb SYSTEM

O. V. Yushkova (Belonogova)<sup>1,\*</sup>, A. I. Bezrukikh<sup>1</sup>, V. P. Zhereb<sup>1,2</sup>, N. E. Stepanenko<sup>1</sup>, A. S. Saparova<sup>1</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: Olga\_Yushkova\_1954@mail.ru

*The modifying ability of Al-Ti-Nb master alloys has been studied. Using scanning electron microscopy and X-ray microanalysis,  $Al_3Nb$  particles were found. According to the results of the Alcan test, the optimal composition of the master alloy for A85 aluminum was proposed.*

*Keywords: Al-Ti-Nb system alloys, A85 aluminum microstructure master alloy,  $Al_3Nb$  intermetallic compound.*

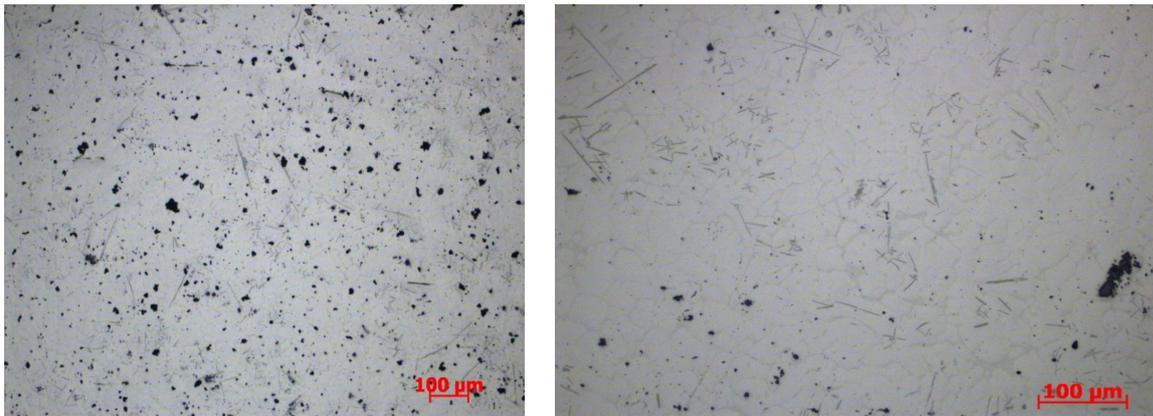
В системе Al – Ti – Nb образуются высокотемпературные интерметаллиды [1, 2], поэтому сплавы этой системы перспективны для управления микроструктурой и свойствами других, прежде всего, алюминиевых сплавов различного назначения. Модифицирующий эффект таких лигатур связывают с присутствием в расплаве высокотемпературных частиц интерметаллидов  $Al_3Nb$  и  $AlNb_2$  в низких концентрациях [1-4].

**Исходные материалы и методы исследования.** Модифицирующий эффект исследовали на алюминии марки А85, являющимся основой для большинства промышленных сплавов. Исходную механическую смесь стружек Al, стружку металла Nb и губчатый Ti сплавляли в индукционной печи К-240 и разливали в подогретую изложницу.

Исследование микроструктуры и микрорентгеноспектральный анализа (МРСА) выполняли на световом (СМ) и растровом электронном микроскопах (РЭМ) EVO 50XVP с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350. Объемный элементный состав образцов сплавов определяли на рентгено-флуоресцентном спектрометре SHIMADZU XRF-1800.

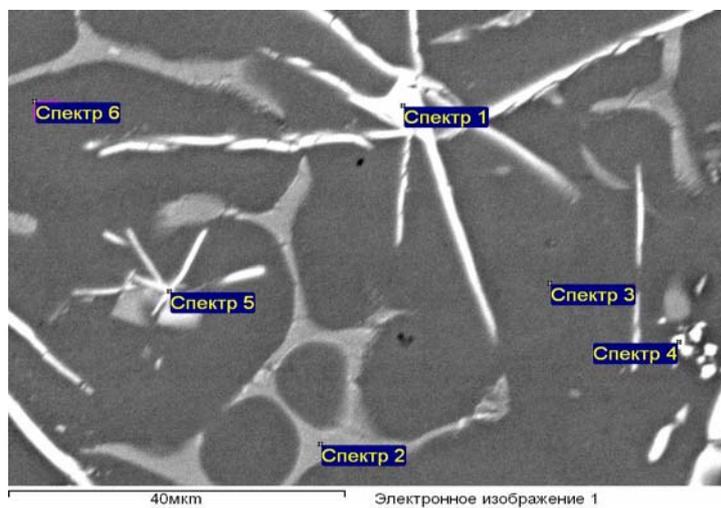
**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 и 2 представлены микроструктуры алюминиевого сплава, содержащего титан и ниобий. На фото микроструктур, полученных с помощью СМ (рис. 1а, б) представлены черные выделения второй фазы – частицы графита. Кроме преимущественной матрицы

твёрдых растворов с помощью РЭМ (рис. 1в) обнаружены иглоподобные кристаллы, соответствующие составам  $Al_3Nb$  и  $Al_3Ti$  [5].



а

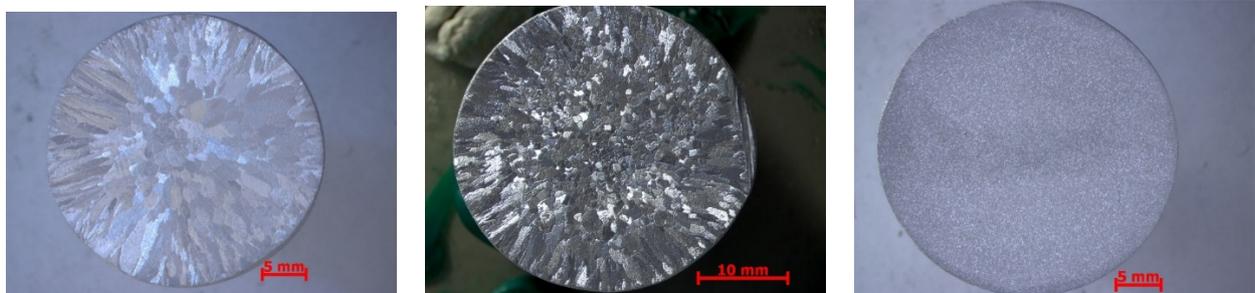
б



в

Рис. 1. Фотографии микроструктуры сплава Al-Ti-Nb, полученные с помощью СМ (а, б), РЭМ (в) и результаты МРСА (г)

На рис. 2 представлены результаты Alcan-теста, показывающие высокую модифицирующую способность (Рис. 2в) лигатур, содержащих Al-Ti-Nb.



а

б

в

Рис. 2. Результаты Alcan-теста (СМ)

Выполненное исследование позволило получить многофазный алюминиевый сплав, содержащий дисперсные, преимущественно неизометрические, частицы  $Al_3Nb$  и  $Al_3Ti$  30-40 мкм длиной и 7-10 мкм шириной, а также частицы графита, равномерно распределенные в матрице основного металла. Исследованный фазовый состав и размеры вторых фаз, а также характер их распределения в сплаве позволяют рассматривать полученный материал как перспективный модификатор для широкого круга промышленных алюминиевых сплавов.

#### Выводы.

1. С помощью световой и растровой электронной микроскопии, а также микрорентгеноспектрального анализа исследована морфология и элементное распределение компонентов в полученных сплавах. Обнаружено выделение никеля по границам зерен при кристаллизации алюминиевой матрицы.

2. По результатам Alcan-теста определены модифицирующие свойства полученных сплавов и определен состав лигатуры, который следует рассматривать как наиболее перспективных модификатор.

#### Библиографические ссылки

1. Novel Al-Ti-Nb-B grain refiners with superior efficiency for Al-Si alloys / Y. Li, Y. Jiang, B. Hu et al. // *Scripta Materialia*, 2020. Vol. 187. P. 262–267.
2. Microstructure evolution and nano-hardness modulation of rapidly solidified Ti–Al–Nb alloy / C. Liang, J. F. Zhao, J. Chang et. al. // *Journal of Alloys and Compounds*, 2020. Vol. 836. P. 155538.
3. Тройные диаграммы на основе алюминидов титана. Анализ и построение / В. Д. Клопотов, А. И. Потехаев, А. А. Клопотов и др. // *Изв. Томского политехн. ун-та*. 2013. Т. 232. № 2. С. 96–100.
4. Appel F., Paul J. D. H., Oehring M. *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*. Weinheim : Wiley-VCH. 2011. 752 p.
5. Thermodynamic re-assessment of the Ti Al Nb system / M. Damian, B. Cupida, O. Fabrichnaya et al. // *Int. J. Mat. Res.*, 2009. Vol. 100. No 2. P. 218–233.

#### References

1. Novel Al-Ti-Nb-B grain refiners with superior efficiency for Al-Si alloys / Y. Li, Y. Jiang, B. Hu et al. // *Scripta Materialia*, 2020. Vol. 187. P. 262–267.
2. Microstructure evolution and nano-hardness modulation of rapidly solidified Ti–Al–Nb alloy / C. Liang, J. F. Zhao, J. Chang et. al. // *Journal of Alloys and Compounds*, 2020. Vol. 836. P. 155538.
3. *Troyhie diagrammy na osnove aluminida titana. Analiz i postroenie*. [Triple diagrams based on titanium aluminide. Analysis and construction] / V. D. Klopotov, A. I. Potekaev, A. A. Klopotov et al. // *Izv. Tomskogo politehn. un-ta*. 2013. Vol. 232. No 2. P. 96–100. (In Russ.).
4. Appel F., Paul J. D. H., Oehring M. *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*. Weinheim: Wiley-VCH. 2011. 752 p.
5. Thermodynamic re-assessment of the Ti Al Nb system / M. Damian, B. Cupida, O. Fabrichnaya et al. // *Int. J. Mat. Res.*, 2009. Vol. 100. No 2. P. 218–233.

© Юшкова О. В., Безруких А. И., Жереб В. П., Степаненко Н. Е., Сапарова А. С., 2022



**Секция**  
**«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ»**

УДК 629.784

**2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ОБЪЕКТА  
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В НЕВЕСОМОСТИ**

С. В. Аринчев

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5, строение 1  
E-mail: arinchev@inbox.ru

*Цель космического мусоросборщика – не весь крупногабаритный объект целиком, а только два его встроенных фрагмента. Объект мусора защищает себя вращением. Целевые фрагменты вырезаются лазером. Разлет фрагментов исследуется методом частиц.*

*Ключевые слова: лазерная резка, космический мусоросборщик, метод частиц.*

**2D-SIMULATION OF THE GRAVITY-FREE LASER-CUTTING DYNAMIC PROCESS  
APPLIED TO THE LARGE SPACE-DEBRIS OBJECT**

S. V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)  
5/1, 2-ya Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russian Federation  
E-mail: arinchev@inbox.ru

*The target of the space-debris collector is not the entire large space-debris object, but its two built-in blocks only. The object defends itself by its orientation change. The two blocks are cut out using a laser. The target-block velocity 2D-estimates are obtained using the particle approach.*

*Keywords: laser cutting, space-debris collector, particle approach.*

**Постановка задачи.** Мусоросборщик выбирает и захватывает (уносит с собой) только небольшие фрагменты космического мусора [1]. Рассмотрена ситуация, когда целевые фрагменты мусора – это встроенные блоки крупногабаритной упругой конструкции космического объекта. Начальные положение и скорости мусоросборщика относительно объекта мусора на орбите заданы [2]. Целевые блоки вырезаются из объекта лазером. Объект защищает себя включением двигателей ориентации. На мусоросборщике работают двигатели ориентации, интенсивно движется лазерная головка. Возникают сильные колебания упругой конструкции объекта и упругой конструкции мусоросборщика. Исследуется процесс разлета целевых фрагментов мусора. Процесс захвата данных фрагментов не рассматривается.

**Методика 2D-моделирования.** Крупногабаритный объект мусора и мусоросборщик в невесомости произвольно вращаются. Пространственное представление поверхности лазерной резки и использование понятия твердого тела затруднительно [3-4]. Поэтому использован метод частиц [5-6]. Вместо понятия «режущий луч» на плоскости введено понятие "режущая точка". 2D-модель рассматриваемой системы представлена на рис. 1.

Сформулирована задача Коши с начальными условиями. Задача геометрически нелинейна. Рис. 2 иллюстрирует процесс разлета и интенсивные колебания частиц вырезаемых фрагментов космического мусора.

В ходе выступления докладчик представляет электронный учебник нового поколения [7].

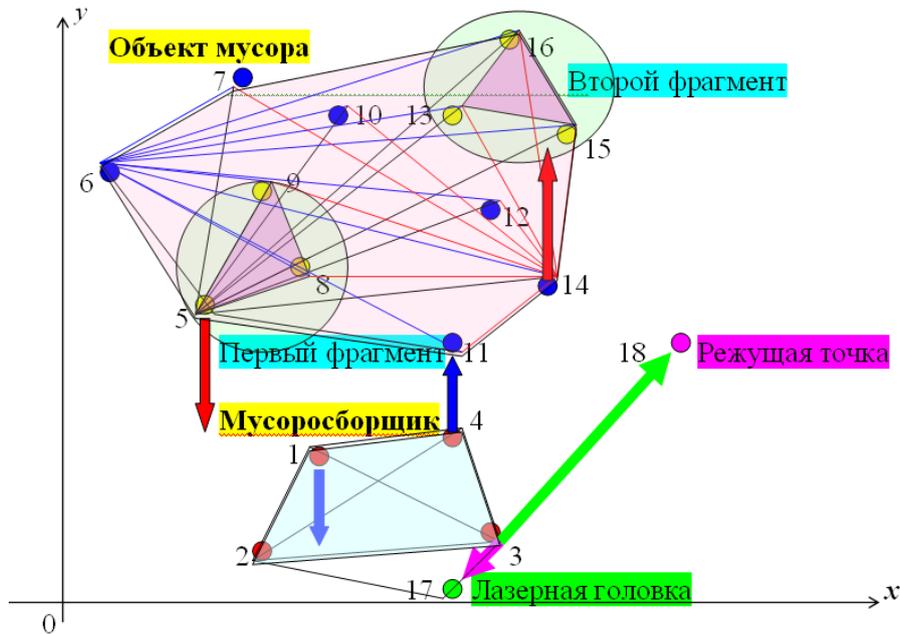


Рис. 1. Рассматриваемые 2D-модели крупногабаритного объекта мусора и мусоросборщика

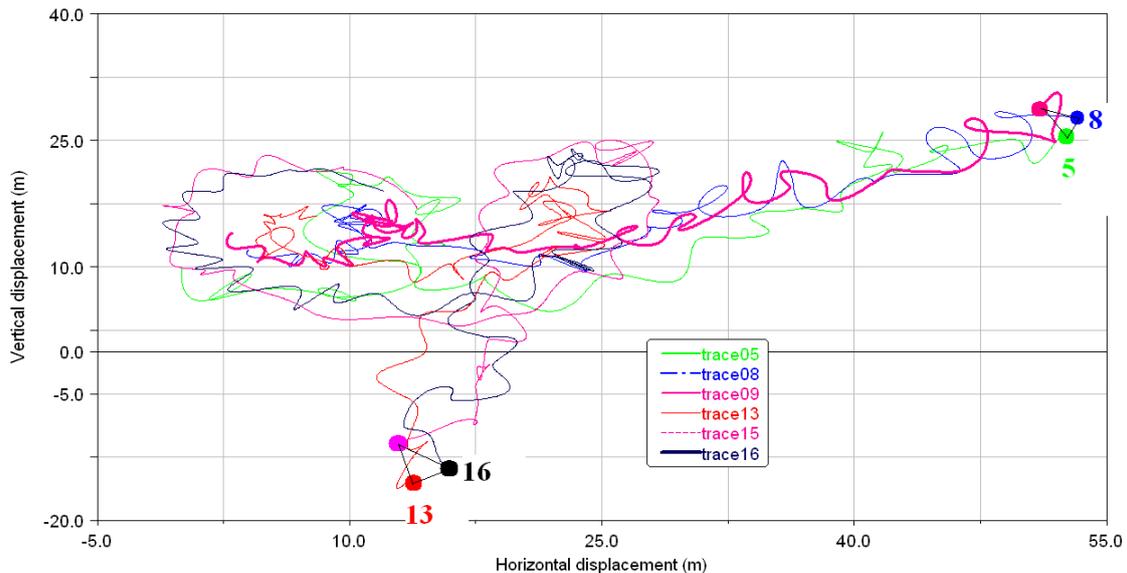


Рис. 2. Траектории движения частиц двух вырезанных фрагментов в процессе лазерной резки

### Выводы:

1. В невесомости объект космического мусора и мусоросборщик произвольно вращаются. Представление поверхности резания затруднительно. Поэтому в данной задаче предложено отказаться от понятия твердого тела, предложено использовать метод частиц.
2. Задача лазерной резки сведена к задаче деактивации связей между частицами 2D-модели. Сформулированы математические условия деактивации данных связей.
3. Показано, что в условиях невесомости прицеливание невозможно. Движение режущей точки имеет хаотический характер. Сохранность вырезаемых фрагментов и требуемая полнота резки обеспечивается своевременным включением и отключением лазера.

### Библиографические ссылки

1. Сомов Е. И., Бутырин С. А., Сомов С. Е. Управление космическим роботом-манипулятором при встрече и механическом захвате пассивного спутника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Том 20. № 6. С. 202-209.
2. Аринчев С. В. Анализ динамики перелета космического мусоросборщика из плоскости своей орбиты в плоскость орбиты фрагмента мусора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 1 (718). С. 63-71. doi:10.18698/0536-1044-2020-1-63-71
3. Ахрамович С. А., Малышев В. В., Старков А. В. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в бикватернионной форме // Полет. Общероссийский научно-технический журнал (Московский Авиационный Институт). 2018. № 4. С. 9-20.
4. Finger J., Weinand M., Wortmann D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power // Journal of Laser Applications. 2013. Vol. 25. 042007. doi:10.2351/1.4807082.
5. Аринчев С. В. Двойная гирочастица как инструмент решения задач аэроупругости в сверхзвуковом потоке // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 5 (722). С. 62-73. doi:10.18698/0536-1044-2020-5-62-73.
6. Аринчев С. В. 3-й закон Ньютона – это не догма. Это расчетная гипотеза // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 6 (726). С. 36-50. doi:10.18698/0536-1044-2020-6-36-50.
7. Аринчев С. В. Проектирование космического мусоросборщика (электронный учебник на флеш-карте 64 Гб). М. : САМИЗДАТ, 2020. Объем информации 31.3 Гб.

### References

1. Somov E. I., Butyrin S. A., Somov S. E. *Upravleniye kosmicheskim robotom-manipulatorom pri vstreche i mekhanicheskom zakhvate passivnogo sputnika* [Mechanical capture of a passive satellite using a space manipulator] // *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2018, vol. 20, no. 6, p. 202-209 (In Russian).
2. Arinchev S. V. *Analiz dinamiki pereleta kosmicheskogo musorosborshchika iz ploskosti svoey orbity v ploskost orbity fragmenta musora* [Dynamics of the space-debris-collector orbital transfer from out its own orbit into the orbit of the debris fragment] // *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2020, no. 1 (718), p. 63-71 (In Russian).
3. Akhramovich S. A., Malyshev V. V., Starkov A. V. *Matematicheskaya model dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata v bikvaternionnoy forme* [Biquaternion modelling of the air-drone motion] // *Polyot. Obshcherossiyskiy nauchno-technicheskiy zhurnal (Moskovskiy Aviatsionniy Institute)*. 2018, no. 4, p. 9-20 (In Russian).
4. Finger J., Weinand M., Wortmann D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power // *Journal of Laser Applications*. 2013, vol. 25, 042007. doi:10.2351/1.4807082.
5. Arinchev S. V. *Dvoynaya gyrochastitsa kak instrument resheniya zadach aerouprugosti v sverkhzvukovom potoke* [The two-mass gyro-particle as the tool for supersonic aeroelasticity analysis] // *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2020, no. 5 (722), p. 62-73. doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-62-73 (In Russian).
6. Arinchev S. V. *Tretiy zakon Newtona – eto ne dogma. Eto raschetnaya gipoteza* [The 3-rd Newton's law is not the dogma. It is the computation hypothesis] // *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2020, no. 6 (726), p. 36-50 (In Russian).
7. Arinchev S. V. *Proyektirovaniye kosmicheskogo musorosborshchika (electronniy uchebnyk na flash-karte 64 GB)* [Space-debris-collector computer-aided design (the electronic manual within the 64 GB flash-memory drive)]. Moscow, SAMIZDAT, 2020, 31.3 GB (In Russian).

УДК 681.586.728

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА УПЛОТНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОПРИВОДА

В. С. Ереско<sup>1</sup>, С. П. Ереско<sup>2\*</sup>, Т. Т. Ереско<sup>2</sup>, Д. Ю. Терсков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «ЦКБ «Геофизика»

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, улица академика Киренского, д. 89

<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>ООО «Артеб-ресурс»

Российская Федерация, Красноярск, Дудинская улица, дом 3, офис 101

\*E-mail: eresko07@mail.ru

*Рассмотрены особенности технологической подготовки производства уплотнений элементов гидроприводов. Манжетные уплотнители применяются для обеспечения герметичности исполнительных агрегатов гидросистем. Применяемые в настоящее время методы производства контактных уплотнений с помощью литевых пресс-форм основаны на выборе размеров из ГОСТ на уплотнения и пресс-формы. Однако размеры, приведенные в ГОСТ, зачастую не гарантируют заданного ресурса, так как не учитывают условий эксплуатации.*

*В статье приведена методика использования трехмерных параметрических моделей при производстве пресс-форм для создания уплотнителей гидросистем.*

*Ключевые слова: уплотнитель, параметрическая модель уплотнителя, параметрическая модель пресс-формы, форматы параметрических моделей.*

## TECHNOLOGICAL PREPARATION FOR THE PRODUCTION OF SEALS FOR HYDRAULIC DRIVE ELEMENTS

V. S. Eresko<sup>1</sup>, S. P. Eresko<sup>2\*</sup>, T. T. Eresko<sup>2</sup>, D. Yu. Terskov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company Central Design Bureau Geophysics

Russian Federation, 660041, Krasnoyarsk, Academician Kirensky Street, 89

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

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

<sup>3</sup>«Arteb-Resource» LLC

Russia, Krasnoyarsk, Dudinskaya street, house 3, office 101

\*E-mail: eresko07@mail.ru

*The features of technological preparation for the production of seals for hydraulic drive elements are considered. Lip seals are used to ensure the tightness of hydraulic system actuating units. Currently used methods for the production of contact seals using injection molds are based on the selection of dimensions from GOST for seals and molds. However, the dimensions given in GOST often do not guarantee a given resource, since they do not take into account operating conditions.*

*The article presents a technique for using three-dimensional parametric models in the production of molds for creating hydraulic system seals.*

*Keywords: compactor, parametric model of the compactor, parametric mold model, formats of parametric models.*

В настоящее время выпускается, множество различных гидроагрегатов нестандартной комплектации, так как множество гидромашин импортируется из различных стран, в которых есть отличия в конструкторской документации при производстве уплотнительных узлов.

В данной работе рассмотрены особенности технологической подготовки производства на стадии процесса проектирования пресс-форм для изготовления манжетных уплотнений. Применяемые в настоящее время методы производства контактных уплотнений с помощью литьевых пресс-форм основаны на выборе размеров из ГОСТ на уплотнения и пресс-формы. Но так, как российский ГОСТ не в полном объеме предусматривает типоразмеры уплотнителей в импортных гидромашинах, существует необходимость в создании универсальной системы проектирования, чтобы обеспечивать импортные машины ЗИП и разработку новых уплотнителей с более высокими качественными характеристиками, для повышения КПД, уменьшения утечек рабочей жидкости через уплотнитель, а также использование композитных материалов, которые менее подвержены усталостному износу и старению. В работе [1] описана методика автоматизации технологического процесса, включающего процесс изготовления пресс-форм, подготовку трехмерной параметрической модели манжеты и шаблонов/заготовок пресс-формы.

Параметрическая модель включает несколько формальных переменных, которые посредством файла обмена позволяют присваивать им фактические значения, полученные в результате предварительных вычислений. К таким параметрам относятся угол раскрытия «усов» манжеты, размеры уплотнительного гнезда и высота сечения манжеты. Остальные параметры нужны для создания пресс-формы манжеты. В работе [1] была создана параметрическая модель пресс-формы. Чтобы использовать данную модель в производстве согласно ISO 9001:2008 «Системы менеджмента качества. Требования», необходимо использовать открытый формат передачи данных, одним из таких форматов является формат \*.STL, он способен передавать информацию о материале изготавливаемого продукта, степени точности и пригоден для использования в станках с ЧПУ.

Трехмерные модели должны быть оформлены правильным образом, для использования в станках с ЧПУ при использовании формата \*.STL. В дальнейшей работе будет разработана методика подготовки параметрических трехмерных моделей для использования в станках с ЧПУ. Формат STL (*Standard Tessellation Language*) широко используется для быстрого прототипирования и станками с ЧПУ. Этот формат может быть представлен в виде ASCII или в двоичном виде, что более предпочтительно, так как двоичный формат более компактен. Формат дает представление трехмерного объекта только посредством геометрии его поверхностей, без ссылок на его текстуру, цвет, материал или других обычных атрибутов трехмерной модели разработанной в CAD системе.

Так как STL-формат передает не полную информацию о трехмерной модели, возникают ошибки, связанные с импортом-экспортом таких файлов. Во-первых STL-файл – это всегда аппроксимация исходной трехмерной модели, так как он имеет полигонально-сеточную структуру, т.е. поверхности состоят из небольших по размеру треугольников (фасетов). При экспорте трехмерной модели векторно-заданные, например, линейные размеры аппроксимируются до любого целого числа фасетов, что влечет за собой появление такого параметра как допуск линейного размера. Также вместе с этим появляются допуски формы.

В нашем случае возьмем трехмерную модель пуансона пресс-формы манжеты, она показана на рис. 1.

Экспортируем и импортируем эту деталь через формат STL при допуске линейного размера (катета фасета) 0.32 мм и допуске формы (минимальный угол в фасете) 30 град., результат операции импорта-экспорта показан на рис. 2.

Как видно из рис. 2, формообразующая грань на пуансоне частично потеряна (30%) вследствие слишком большого размера треугольника. Следовательно, разрешение (количество фасетов) необходимо увеличить. Уменьшаем допуск линейного размера до 0,12 мм, а угол до 10 град. Результат операции импорта-экспорта показан на рис. 3.

Количество фасетов возросло (7858 шт) вместе с тем увеличилась и точность репрезентации трехмерной модели в бинарном файле.

Следовательно типичная ошибка (потеря мелких граней детали) решается путем увеличения разрешения экспорта детали в формат STL, остальные ошибки STL-файла типа неправильного направления нормалей в фасетах или же неверная стыковка фасетов не приводят к браку деталей, но затрудняют само формообразование детали, в случае с фрезеровочным с танком под управлением ЧПУ. Поэтому перед обработкой заготовки требуется настройка самого станка, так как образование фасетов на скруглениях зависит от выбора инструмента обработки и при фрезерном удалении материала углы и шероховатости будут убраны допуском самого инструмента, например если допуск инструмента (резца) 0.1 мм, а допуск линейного размера фасета 0.12 мм, погрешность обработки при фрезерова-

нии составит от 0.02 до 0.08 мм, что удовлетворяет условиям обработки деталей пресс-форм для манжетных уплотнений (0.1 мм), а если же обрабатывать деталь другим методом, типа радиальной пилы то количество технологических операций увеличивается в разы и допуск увеличивается также примерно в 2-3 раза.

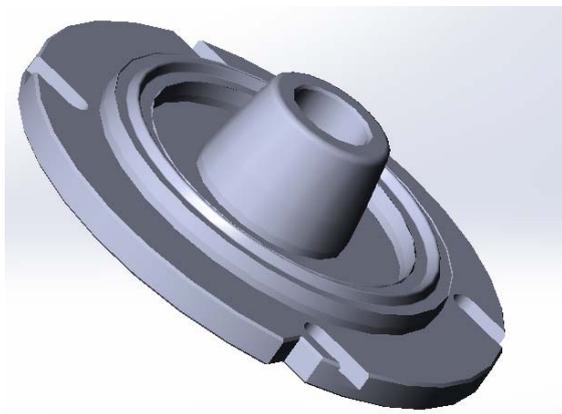


Рис. 1. Внешний вид трехмерной модели пуансона пресс-формы манжеты

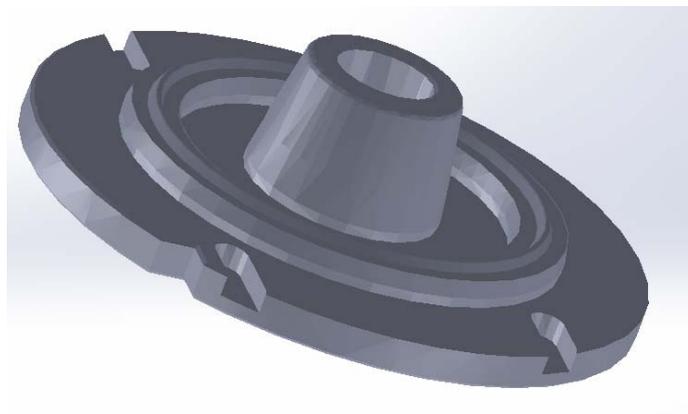


Рис. 2. Внешний вид импортированного STL-формата в грубом разрешении

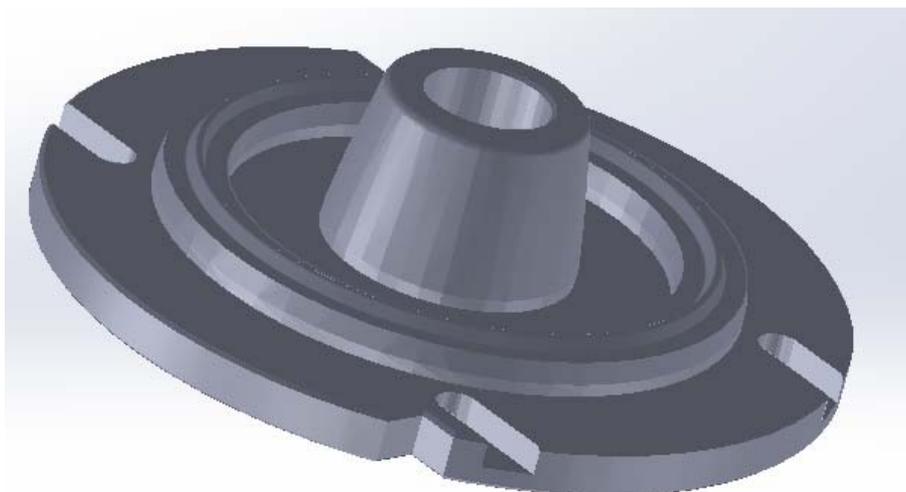


Рис. 3. Внешний вид импортированного STL-формата в точном разрешении

Следовательно, при подготовке трехмерной модели к экспорту в формат STL необходимо избегать образования мелких граней менее 0.3 мм, чтобы не потерять их в процессе преобразования трехмерной модели в файл обмена и предварительно выбирать инструмент для фрезерной обработки станком с ЧПУ.

Современная технологическая подготовка производства невозможна без применения средств вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования не только самих изделий, но и технологических процессов их изготовления. Соответствующие разработки авторов приведены в работах [2,11]. Указанные разработки позволяют значительно сократить сроки проектирования изделий при одновременном повышении качества проектных решений.

#### Библиографические ссылки

1. Совершенствование процесса проектирования пресс-форм для изготовления манжетных уплотнений / В.С. Ереско, С.П. Ереско, А.Н. Антамошкин, Т.Т. Ереско // материалы XVI междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (7-9 ноябр.

2012, г. Красноярск): в двух ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. Ч.1. с. 238-240.

2. Ереско В.С. Автоматизированное проектирование уплотнений гидроагрегатов и пресс-форм для их изготовления / В.С. Ереско, С.П. Ереско, А.Н. Антамошкин // Мат-лы 15-й Международной конференции «Решетневские чтения», Красноярск: СибГАУ, 2011, с.-212-213.

3. Ереско В.С. Автоматизация разработки параметрических моделей контактных уплотнений подвижных соединений и пресс-форм для их изготовления / В.С. Ереско, С.П. Ереско, А.Н. Антамошкин, Т.Т. Ереско // Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал, № 1 (13). Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2012.- С. 22-27.

4. Ереско В.С. Автоматизация технологического процесса производства пресс-форм для изготовления манжетных уплотнений / В.С. Ереско, С.П. Ереско, А.Н. Антамошкин, Т.Т. Ереско // Вестник СибГАУ. Вып. 2 (42), Красноярск: СибГАУ, 2012. с. 130-135.

5. Ереско, С.П. Система управления надежностью уплотнений подвижных соединений гидроагрегатов строительных машин: Дисс. докт. техн. наук 05.02.02. защищена 31.10.2003, утв. 12.03.2004. Красноярск: НИИ СУВПТ, 2003.- 425 с.

6. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611605 (РФ) / Проверка уникальности наименований файлов блока исходных данных АСУТП пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (ASULING) / С.П. Ереско, М.А. Незнамов, Т.Т. Ереско, В.С. Ереско; Заявл. 11.05.2005, № 2005611012; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

7. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611606 (РФ) / (CADFOX) для работы с базами данных FoxPro из сеанса AutoCAD / С.П. Ереско, М.А. Незнамов, Т.Т. Ереско, В.С. Ереско; Заявл. 13.05.2005, № 2005611050; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

8. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611607 (РФ) / Параметризация графических примитивов пакетов пресс-форм и разработка двумерных чертежей пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (ASU\_V)/ С.П. Ереско, М.А. Незнамов, Т.Т. Ереско, В.С. Ереско; Заявл. 13.05.2005, № 2005611051; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

9. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611608 (РФ) / Разработка растровых слайдов графических объектов АСУТП пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (ASU\_R)/ С.П. Ереско, М.А. Незнамов, Т.Т. Ереско, В.С. Ереско; Заявл. 13.05.2005, № 2005611052; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

10. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611609 (РФ) / Генерация специализированного экранного интерфейса АСУТП пресс-форм гидропневмоагрегатов в AutoCAD (CADLISP)/ С.П. Ереско, М.А. Незнамов, Т.Т. Ереско, В.С. Ереско; Заявл. 13.05.2005, № 2005611053; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

11. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611608 (РФ) / Обработка архива параметризованных DXF – файлов в формате СУБД FoxPro и обратной связи БД FoxPro и AutoCAD в АСУТП пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (FOXCAD)/ С.П. Ереско, М.А. Незнамов, Т.Т. Ереско, В.С. Ереско; Заявл. 13.05.2005, № 2005611054; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

## References

1. Sovershenstvovanie processa proektirovaniya press-form dlya izgotovleniya manzhetnyh uplotnenij / V.S. Eresko, S.P. Eresko, A.N. Antamoshkin, T.T. Eresko // materialy XVI mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pyamyati gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M.F. Reshetneva (7-9 noyabr. 2012, g. Krasnoyarsk): v dvuh ch. / pod obshch. red. YU.YU. Loginova; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2012. CH.1. s. 238-240.

2. Eresko V.S. Avtomatizirovannoe proektirovanie uplotnenij gidroagregatov i press-form dlya ih izgotovleniya / V.S. Eresko, S.P. Eresko, A.N. Antamoshkin // Mat-ly 15-j Mezhdunarodnoj konferencii «Reshetnevskie chteniya», Krasnoyarsk: SibGAU, 2011, s. 212-213.

3. Eresko V.S. Avtomatizaciya razrabotki parametricheskikh modelej kontaktnyh uplotnenij podvizhnyh soedinenij i press-form dlya ih izgotovleniya / V.S. Eresko, S.P. Eresko, A.N. Antamoshkin, T.T. Eresko // Sistemy. Metody. Tekhnologii: nauchnyj periodicheskij zhurnal, № 1 (13). Bratsk: GOU VPO «BrGU», 2012. S. 22-27.

4. Eresko V.S. Avtomatizaciya tekhnologicheskogo processa proizvodstva press-form dlya izgotovleniya manzhetnyh uplotnenij / V.S. Eresko, S.P. Eresko, A.N. Antamoshkin, T.T. Eresko // Vestnik SibGAU. Vyp. 2 (42), Krasnoyarsk: SibGAU, 2012. s. 130-135.

5. Eresko, S.P. Sistema upravleniya nadezhnost'yu uplotnenij podvizhnyh soedinenij gidroagregatov stroitel'nyh mashin: Diss. dokt. tekhn. nauk 05.02.02. zashchishchena 31.10.2003, utv. 12.03.2004 .- Krasnoyarsk: NII SUVPT, 2003. 425 s.

6. Svidet. ob ofic. registr. programmy dlya EVM № 2005611605 (RF) / Proverka unikal'nosti naimenovaniy fajlov bloka iskhodnyh dannyh ASUTP press-form uplotnenij gidropnevmoagregatov (ASULING) / C.P. Eresko, M.A. Neznamov, T.T. Eresko, V.S. Eresko; Zayavl. 11.05.2005, № 2005611012; Zaregistr. Rospatent 29.06.2005 g.

7. Svidet. ob ofic. registr. programmy dlya EVM № 2005611606 (RF) / (CADFOX) dlya raboty s bazami dannyh FoxPro iz seansa AutoCAD / C.P. Eresko, M.A. Neznamov, T.T. Eresko, V.S. Eresko; Zayavl. 13.05.2005, № 2005611050; Zaregistr. Rospatent 29.06.2005 g.

8. Svidet. ob ofic. registr. programmy dlya EVM № 2005611607 (RF) / Parametrizaciya graficheskikh primitivov paketov press-form i razrabotka dvumernykh chertezhej press-form uplotnenij gidropnevmoagregatov (ASU\_V)/ C.P. Eresko, M.A. Neznamov, T.T. Eresko, V.S. Eresko; Zayavl. 13.05.2005, № 2005611051; Zaregistr. Rospatent 29.06.2005 g.

9. Svidet. ob ofic. registr. programmy dlya EVM № 2005611608 (RF) / Razrabotka rastrovyyh slajdov graficheskikh ob"ektov ASUTP press-form uplotnenij gidropnevmoagregatov (ASU\_R)/ C.P. Eresko, M.A. Neznamov, T.T. Eresko, V.S. Eresko; Zayavl. 13.05.2005, № 2005611052; Zaregistr. Rospatent 29.06.2005 g.

10. Svidet. ob ofic. registr. programmy dlya EVM № 2005611609 (RF) / Generaciya specializirovannogo ekrannogo interfejsa ASUTP press-form gidropnevmoagregatov v AutoCAD (CADLISP)/ C.P. Eresko, M.A. Neznamov, T.T. Eresko, V.S. Eresko; Zayavl. 13.05.2005, № 2005611053; Zaregistr. Rospatent 29.06.2005 g.

11. Svidet. ob ofic. registr. programmy dlya EVM № 2005611608 (RF) / Obrabotka arhiva parametrizirovannykh DXF – fajlov v formate SUBD FoxPro i obratnoj svyazi BD FoxPro i AutoCAD v ASUTP press-form uplotnenij gidropnevmoagregatov (FOXCAD)/ C.P. Eresko, M.A. Neznamov, T.T. Eresko, V.S. Eresko; Zayavl. 13.05.2005, № 2005611054; Zaregistr. Rospatent 29.06.2005 g.

© Ереско В. С., Ереско С. П., Ереско Т. Т., Терсков Д. Ю., 2022

УДК 621.785.53; 539.25

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ АЗОТИРОВАНИЮ В ПЛАЗМЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА С НАКАЛЕННЫМ КАТОДОМ

С. П. Ереско<sup>1\*</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2</sup>, А. А. Клопотов<sup>3</sup>, И. В. Лопатин<sup>2</sup>, С. В. Лыков<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>Институт сильноточной электроники СО РАН

Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет

Российская Федерация, 634002, г. Томск, пл. Соляная, 2

\*E-mail: eresko07@mail.ru

*Показано, что нагревание образцов до температуры азотирования в элионном режиме, используя электронную и ионную компоненты плазмы, приводит к существенно меньшему (более чем в три раза) уровню шероховатости материала по сравнению с образцами, нагревание которых при азотировании осуществляли ионной составляющей плазмы. Это позволяет рекомендовать элионный режим азотирования деталей и изделий **ракетно-космической отрасли**, не допускающих повышения уровня шероховатости поверхности.*

*Ключевые слова: азотирование, элионный режим, плазма, несамостоятельный дуговой разряд.*

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-CHROMIUM STEEL SUBJECTED TO NITRIDING IN PLASMA OF AN INDEPENDENT ARC DISCHARGE WITH AN INCANDESCENT CATHODE

S. P. Eresko<sup>1</sup>, Yu. F. Ivanov<sup>2</sup>, A. A. Klopotov<sup>3</sup>, I. V. Lopatin<sup>2</sup>, S. V. Lykov<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>Institute of High Current Electronics SB RAS,

2/3, Academic prospect, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building,

2, Solyanaya square, Tomsk, 634002, Russian Federation

\* E-mail: eresko07@mail.ru

*It is shown that heating the samples to the nitriding temperature in the ion mode using the electronic and ionic components of the plasma leads to a significantly lower (more than three times) level of roughness of the material compared to samples heated during nitriding by the ionic component of the plasma. This makes it possible to recommend the elion mode of nitriding of parts and products of **the rocket and space industry** that do not allow an increase in the level of surface roughness.*

*Keywords: nitriding, ion mode, plasma, independent arc discharge.*

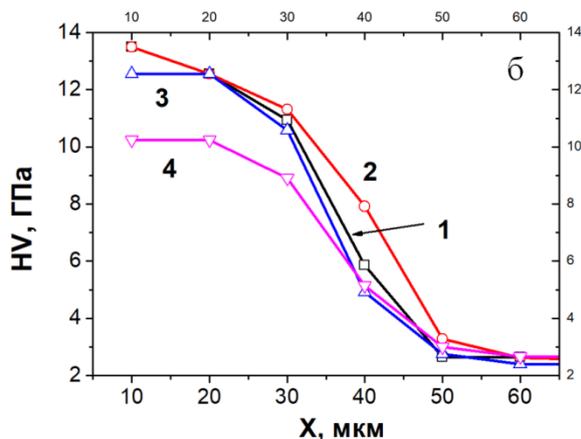
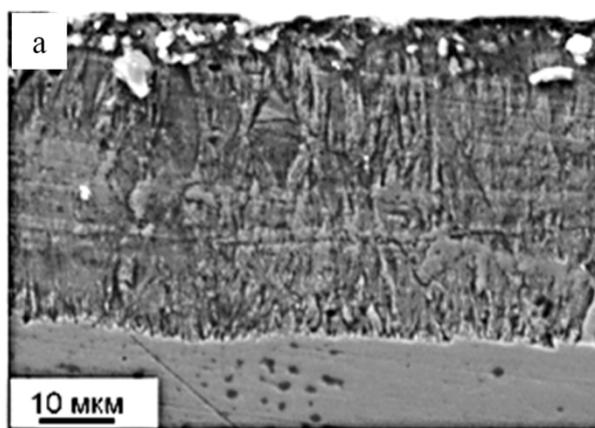
**Введение.** Использование дуговых разрядов низкого давления с накаленным катодом, позволяющих генерировать потоки газовой плазмы без микрокапель, осуществлять ионную очистку (травление) поверхности и разогревать обрабатываемую деталь до требуемой температуры, является перспективным для проведения процессов химико-термической обработки [1, 2]. Энергия ионов и их средний ток, при этом, часто оказываются избыточными для ионной очистки обрабатываемой поверхности, что приводит к ее интенсивному травлению и существенному увеличению шероховатости поверхности детали [3, 4]. Для эффективного нагревания подложки в [5] предложено использовать

электронную компоненту плазмы разряда. Воздействие низкоэнергетичных (десятки эВ) электронов плазмы разряда с плотностями тока до десятков  $A/cm^2$  не производит травления, однако и не обеспечивает ее очистки. Следовательно, для обеспечения нагревания подложки и ее эффективной очистки необходимо чередование воздействия на нее электронной и ионных компонент плазмы разряда. Такой режим обработки изделий назван элионным, то есть включающим воздействие как электронной, так и ионной компонент плазмы несамостоятельного дугового разряда с накалившимся катодом. Сравнительно низкий уровень травления поверхности позволяет рекомендовать элионный режим азотирования деталей и изделий ракетно-космической отрасли, для которых повышение уровня шероховатости поверхности недопустимо.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ эволюции структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалившимся катодом в условиях нагревания образцов до температуры азотирования, во-первых, ионной компонентой плазмы и, во-вторых, электронной и ионной компонентами плазмы.

**Материал и методика.** Материалом исследования являлись образцы высокохромистой стали марки 20X23N18 (зарубежный аналог AISI 310S). Азотирование стали осуществляли на установке «ТРИО», дооснащенной блоком коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки. Азотирование проводили при температурах (723–873) К в течение (1, 3 и 5) часов. Температура образцов регулировалась коэффициентом заполнения электронной фазы. Исследование структуры, элементного и фазового состава модифицированной стали осуществляли методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии. Механические свойства стали характеризовали микротвердостью; трибологические свойства – износостойкостью и коэффициентом трения.

**Результаты и обсуждение.** Установлено, что, независимо от способа нагревания образцов, твердость стали максимальна у поверхности азотирования и монотонно снижается по мере увеличения расстояния от поверхности образца (см. рисунок).



Структура поперечного травленного шлифа стали 20X23N18, подвергнутой азотированию при 873 К, 5 час (а); б – профили микротвердости при ионном (кривые 1, 2) и элионном (кривые 3, 4) азотировании в плазме газового разряда низкого давления; 1, 3 – 793 К, 3 час.; 2, 4 – 873 К, 5 час. Нагрузка на индентор 0.5 Н.

Показано, что толщина упрочненного слоя составляет (55–60) мкм и слабо зависит от метода азотирования, температуры (в интервале 793–873 К) и длительности (3–5 час.) процесса (см. рисунок). Обнаружено, что при нагревании образцов ионами плазмы (см. рисунок, б, кривые 1 и 2) твердость упрочненного слоя (при равной толщине слоя) выше по сравнению с образцами, нагревание которых осуществлялось в электронно-ионном режиме (см. рисунок, б, кривые 3 и 4).

Выполнены трибологические испытания стали 20X23N18, подвергнутой азотированию. Установлено, что азотирование стали 20X23N18 в условиях нагревания образцов ионной составляющей плазмы позволяет сформировать поверхностный слой, износостойкость которого более чем в 1,75 раза выше образцов стали 20X23N18, азотирование которых осуществлялось в условиях элионного режима нагревания образцов.

Методами рентгенофазового анализа установлено, что в стали, азотированной в условиях нагревания ионами плазмы, относительное суммарное содержание упрочняющих нитридных фаз достигает 90 масс.%; в стали при элионном азотировании – не превышает 50 масс.%.

Определен уровень шероховатости поверхности образцов. Установлено, что независимо от способа нагревания образцов повышение температуры азотирования в интервале (723–873) К приводит к росту шероховатости поверхности стали. Выявлено, что нагревание образцов до температуры азотирования в элионном режиме приводит к существенно меньшему (более чем в три раза) уровню шероховатости материала по сравнению с образцами, нагревание которых при азотировании осуществляли ионной составляющей плазмы.

**Заключение.** Выполнен сравнительный анализ эволюции структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом в условиях нагревания образцов до температуры азотирования, во-первых, ионной компонентой плазмы и, во-вторых, электронной и ионной компонентами плазмы. Выявлено, что нагревание образцов до температуры азотирования в элионном режиме приводит к существенно меньшему (в 2.2–3.5 раза) уровню шероховатости материала по сравнению с образцами, нагревание которых при азотировании осуществляли ионной составляющей плазмы. Совокупность полученных результатов позволяет рекомендовать элионный режим азотирования стали для случая модифицирования изделий, в том числе ракетно-космической техники, не допускающих повышения уровня шероховатости поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700010.

#### Библиографические ссылки

1. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of Aer Met 100 Martensitic Steel // Plasma Process. Polym. 2007. Vol.4. № 1. P. 700-706.
2. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol.149. № 2-3. P. 95-113.
3. Synthesis of plasma-nitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application / S. Yeo, C. M. Lee, H. Soo et all. // Applied Surface Science. 2022. Vol. 579. 152133.
4. The influence of the plasma-nitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel / Godec M., Ruiz-Zepeda F., Podgornik B. et all. // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 433. 128089.
5. Electron-ion-plasma modification of carbon steel / Y. H. Akhmadeev, Yu. F. Ivanov, O. V. Krysina et all. // High Temperature Material Processes. 2021. 25(1). P. 47–55.

© Ереско С. П., Иванов Ю. Ф., Клопотов А. А., Лопатин И. В., Лыков С. В., 2022

УДК 681.586.728

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ГПС-01

А. С. Ереско<sup>2</sup>, Д. Ю. Терсков<sup>1</sup>, С. П. Ереско<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Артеб-ресурс»

Россия, Красноярск, Дудинская улица, дом 3, офис 101

E-mail: T.D.Y@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: eresko07@mail.ru

*Приведены результаты модернизации базовой конструкции стенда для моделирования и исследования гидропневмосистем исполнительного элемента в виде электромеханического привода, а также приведены результаты модернизации измерительной системы стенда введением в измерительную систему лазерного дальномера с OLED дисплеем, выполненного на платформе модуля Arduino Nano v.3.0 для совершенствования системы измерений учебно-демонстрационной установки ГПС-01.*

*Ключевые слова: электромеханический привод, модернизация, лазерный дальномер, VL53L0X, arduino с OLED дисплеем, учебно-демонстрационная установка, микроконтроллер.*

## MODERNIZATION OF THE LABORATORY STAND GPS-01

A. S. Eresko<sup>2</sup>, D. Yu. Terskov<sup>1</sup>, S. P. Eresko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «Arteb-Resource» LLC

Russian Federation, Krasnoyarsk, Dudinskaya street, house 3, office 101

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

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

E-mail: T.D.Y@mail.ru

*The results of expanding the functionality due to the introduction of an actuator in the form of an electromechanical drive into the basic design of the stand for modeling and research of hydropneumosoystems are presented, as well as the results of upgrading the measuring system of the stand by introducing a laser rangefinder with an OLED display into the measuring system, made on the platform of the Arduino Nano v module.3.0 to improve the measurement system of the GPS-01 training and demonstration installation.*

*Keywords: electromechanical drive, modernization, laser rangefinder, VL53L0X, arduino with OLED display, educational and demonstration installation, microcontroller.*

Задача исследования состоит в расширении функциональных возможностей стенда для исследования гидро-пневно-приводов (ГПС – 01) введением в конструкцию стенда электромеханических приводов при одновременном совершенствовании измерительной системы стенда, введением дополнительных устройств измерения, что позволяет повысить точность измерений и автоматизировать процесс записи результатов для последующей обработки при изменении нагрузочного режима приводов, с целью проведения в том числе и сравнительного анализа различных приводов произвольной структуры и физической природы. В базовый набор учебно-демонстрационной установки ГПС-01 «Гидравлические и пневматические системы и средства автоматизации» включает в себя: ограниченный набор сменных гидравлических и пневматических элементов устройств (магистраль, распределители ручного и автоматического действия, гидравлический мотор, пневматический цилиндр).

Учебный лабораторный стенд ГПС-01(рис.1) позволяет моделировать различные пневматические системы. Для изучения приводов и систем установка оснащена набором сменных пневматических аппаратов и устройств, а также автономным пневматическим источником энергии – компрессором.

Для изучения программируемых логических контроллеров установка оснащена комплексом средств автоматизированного управления, состоящим из контроллера и набора устройств электрического управления и путевых переключателей. В качестве объекта управления используются пневматические исполнительные механизмы и соответственно пневматические распределители с электронным управлением. Условия эксплуатации установки – в помещениях при температурах от плюс 10 до плюс 35 и относительной влажности 80 % при 25.

В базовом варианте исполнения лабораторного стенда отсутствовали модули электроприводных исполнительных механизмов. Целью модернизации являлось проектирование и изготовление электроприводного механизма линейного перемещения на основе шарико-винтовой передачи, а также разработка и изготовление новой измерительной системы лабораторного стенда ГПС-01, включающей в себя: лазерный дальномер с OLED дисплеем, который считывает выдвигания штока пневматического цилиндра или электропривода на определенное расстояние от 0 до 200 мм., в целях расширения возможностей изучения гидравлической системы., а также элементов и возможностей системы ADUINO.

Общий вид сборки лазерного дальномера с сенсорным лазерным датчиком VL53L0X и OLED дисплеем на монтажной плате платформы Arduino приведен на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид панели пневматической системы лабораторного стенда ГПС-01 с установленным разработанным электроприводом

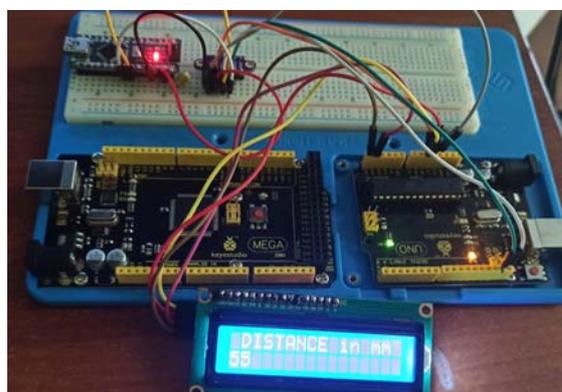


Рис. 2. Лазерный дальномер с сенсорным лазерным датчиком VL53L0X и OLED дисплеем монтажной плате

На учебно-демонстрационной установке ГПС-01 устанавливается гидро пневмо или электропривод. Датчик лазерного дальномера направляется на шток исследуемого объекта. Программа для Arduino считывает показания датчика лазерного дальномера расстояние и время исследуемого объекта. Разработанный лазерный дальномер с использованием Arduino может использоваться на испытательных стендах для выявления скорости и перемещений элементов стенда или исполнительных устройств возвратно поступательного действия или параметров перемещений всего объекта. Работа датчика на основе сенсора VL53L0X базируется на использовании переходных процессов в высокочувствительных однофотонных лавинных диодах. Принцип работы основан на запатентованной STMicroelectronics технологии FlightSense. Поверхностно-излучающий лазер VCSEL с длиной волны 940 нм, выполняет в датчике расстояния VL53L0X роль источника оптического сигнала. Он оснащен встроенным инфракрасным фильтром. Его свечение полностью невидимо для человеческого глаза, и обеспечивает большую дистанцию измерения при меньшей чувствительности к уровню внешнего освещения и более устойчив к перекрестным помехам, вызываемыми стеклянными поверхностями. Из выше сказанного при сравнении ультразвуковое и лазерного дальномера можно сделать вывод что в стендах ГПС-01. Использование датчика на основе лазерного дальномера VL53L0X более предпочтительней в виду нескольких факторов, таких как точность измерения, и факторов, не влияющих на них. Изготовлен и испытан опытный образец датчика измерения расстояния, считывающий показания расстояния в системе стенда в реальном времени. Система измерения состоит из корпуса с жестко закрепленной в нем платы Arduino UNO R3 и датчиком лазерного дальномера VL53L0X, LCD-дисплей 1306.

В общем случае структура измерительной системы диагностирования включает в себя.

Датчики, обеспечивающие преобразование различных физических величин в электрические сигналы; Коммутации, обеспечивающие подключение различных величин по определенной программе; Памяти для хранения значений, промежуточных результатов; Индикация и регистрация для отображения результатов, получаемых в результате выполнения процедур измерения, контроля, вычисления и диагностирования, для выполнения которых привлекаются вычислительные средства с использованием специально разработанной программы на языке программирования С++ в среде платформы Arduino.

Для проведения расчётов применяли библиотеку конечно-элементного анализа FEM системы КОМПАС-3D (компания «АСКОН», г. Санкт-Петербург), разработанную совместно с НТЦ «Автоматизированное проектирование машин» (г. Королёв).

Расчет параметров разработанная конструкции электроприводного исполнительного механизма на основе шарико-винтовой передачи выполнялся с использованием САПР и пакетов конечно-элементного анализа с использованием Программного обеспечения научно технического центра АПМ. Расчет шарико-винтовой передачи. АПМ Winmachine модуль(Screw). Исходные данные для проектирования были приняты следующие **Геометрические данные:** Средний радиус винта – 10 мм. Радиус тел качения – 1,5 мм; радиус дорожки – 1,55 мм.; шаг винта – 4,0 мм.; число тел качения в витке- 12; число рабочих витков- 2. Допуски указанных линейных размеров и накопленная ошибка шага витка, задавались в пределах  $5.00E-04$  м **Физические данные:** Осевая сила -1500 Н; Радиальная сила – 100 Н; Опрокидывающий момент-10 Нм; Частота вращения -300 об/мин; Коэффициент динамичности – 5,0.

**Результат расчета:** Мощность при нагрузке – 0,02 кВт; Долговечность -3000 ч. Макс. контактное напряжение –  $5080 \text{ Н/мм}^2$ ; Выделение тепла –72,3 Дж/час; Момент трения – 0,639 Нм; К.П.Д.- 0,598; Осевое смещение –3,4 мкм; Радиальное смещение – 1,02 мкм; Угловое смещение – 0,508 гр.; Нагрузочная способность – 1940 Н. Спроектированный и изготовленный электромеханический линейный привод, а также измерительная система линейных перемещений внедрены в учебный процесс по дисциплине «Электро-гидро-пневмоприводы», Автоматика и автоматизация».

На учебно-демонстрационной установке ГПС-01 устанавливается гидро или электропривод. Датчик лазерного дальномера направляется на шток исследуемого объекта. Программа для Arduino считывает показания датчика лазерного дальномера расстояние и время исследуемого объекта. Все это расширяет возможный набор учебных, лабораторных и исследовательских работ по гидроприводу и автоматике на учебно-демонстрационном стенде ГПС-01 без дополнительного привлечения значительных материально-технических средств. Результаты работы получены при выполнении магистерской диссертации на тему: «Модернизация измерительной системы лабораторного стенда ГПС-01» в 2019-2021 годы на кафедре «Основы конструирования машин» под руководством Лауреата гранта Президента молодым ученым кандидатам наук, к.т.н., доцента Ереско Александра Сергеевича и внедрена в учебный процесс кафедры «Основы конструирования машин» и частично представлены в работах [1-8].

Все это расширяет возможный набор учебных, лабораторных и исследовательских работ по гидроприводу и автоматике на учебно-демонстрационном стенде ГПС-01 без дополнительного привлечения значительных материально-технических средств.

Результаты доклада получены при выполнении магистерской диссертации на тему: «Модернизация измерительной системы лабораторного стенда ГПС-01» в 2019-2021 годы на кафедре «Основы конструирования машин» под руководством Лауреата гранта Президента молодым ученым кандидатам наук, к.т.н., доцента Ереско Александра Сергеевича и внедрена в учебный процесс кафедры «Основы конструирования машин».

### Библиографические ссылки

1. Сидоров С.В., Ереско С.П. Совершенствование гидропривода учебно- демонстрационной установки ГПС-01// Решетнёвские чтения: материалы XIX международной научной конференции: в 2ч./ под общ. ред. Ю.Ю. Логинова, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 2015 – с. 346-348.

2. Ереско, А.С. Цифровой тахометр с использованием датчика холла на платформе arduino / А.С. Ереско, А.В. Курочкина, Е.В. Иваненко// Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. № 14. С. 363-365.

3. Ереско, А.С. Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino /А.С. Ереско, С.П. Ереско, Т.Т.Ереско, Е.В, Кукушкин, А.А.Орлов // Механики XXI века. 2017. № 16. с. 82-85.
4. Терсков Д. Ю., Ереско А. С. Лазерный дальномер с oled-дисплем Arduino // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2020. Т. 1. № 15. С. 397-399.
5. Ереско А.С., Ереско С.П., Шевцов С.М. Автоматизация процессов измерения вибрации // Механики XXI века. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008.-с.-38-42.
6. Ереско С.П., Шевцов С.М. Аппаратно-программный комплекс для исследования характеристик датчиков вибрации// Мат-лы научно практической конф. «Проблемы авиации и космонавтики».- Красноярск: СибГАУ, 2010. –с.-149.
7. Ереско С.П., Шевцов С.М. Измерительные преобразователи вибрационных процессов// Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал, № 3 (7) .- Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010.-С.-42-49.
8. А.С. Ереско, Д.Ю. Терсков, С.П. Ереско. Модернизация измерительной системы лабораторного стенда ГПС-01 // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. Т. 1. № 16.

### References

1. Sidorov S.V., Eresko S.P. Sovershenstvovanie gidroprivoda uchebno- demonstracionnoj ustanovki GPS-01// Reshetnyovskie chteniya: materialy XIX mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii: v 2ch./ pod obshch. red. YU.YU. Loginova, Sibirskij gosudarstvennyj aerokosmicheskij universitet imeni akademika M. F. Reshetneva, Krasnoyarsk, 2015 – s. 346-348.
2. Eresko, A.S. Cifrovoy tahometr s ispol'zovaniem datchika holla na platforme arduino / A.S. Eresko, A.V. Kurochkina, E.V. Ivanenko// Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki. 2018. Т. 1. № 14. S. 363-365.
3. Eresko, A.S. Razrabotka modulya izmereniya deformacij s pomoshch'yu tenzorezistorov s ispol'zovaniem arduino /A.S. Eresko, S.P. Eresko, T.T.Eresko, E.V, Kukushkin, A.A.Orlov// Mekhaniki HKHI veku. 2017. № 16. s. 82-85.
4. Terskov D. YU., Eresko A. S. Lazernyj dal'nomer s oled-displem Arduino // Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki. 2020. Т. 1. № 15. S. 397-399.
5. Eresko A.S., Eresko S.P., SHEvcov S.M. Avtomatizaciya processov izmereniya vibracii // Mekhaniki XXI veku. VII Vserossijskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem: Sbornik dokladov. – Bratsk: GOU VPO «BrGU», 2008.-s.-38-42.
6. Eresko S.P., SHEvcov S.M. Apparatno-programmnyj kompleks dlya issledovaniya harakteristik datchikov vibracii// Mat-ly nauchno prakticheskoy konf. «Problemy aviacii i kosmonavtiki».- Krasnoyarsk: SibGAU, 2010. –s.-149.
7. Eresko S.P., SHEvcov S.M. Izmeritel'nye preobrazovateli vibracionnyh processov// Sistemy. Metody. Tekhnologii: nauchnyj periodicheskij zhurnal, № 3 (7) .- Bratsk: GOU VPO «BrGU», 2010.-S.-42-49.
8. A.S. Eresko, D.YU. Terskov, S.P. Eresko Modernizaciya izmeritel'noj sistemy laboratornogo stenda GPS-01 // Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki. 2021. Т. 1. № 16.

© Ереско А. С., Терсков Д. Ю., Ереско С. П., 2022

УДК 629.5.06

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДОПУСКАЕМЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ТРУБ НА КАЧЕСТВО И СРОКИ МОНТАЖА ТРУБОПРОВОДОВ

Н. А. Поляков<sup>1\*</sup>, С. Г. Чулкин<sup>1</sup>, С. П. Ереско<sup>2</sup>, Д. Ю. Терсков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
Российская Федерация, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
\*E-mail: nik.polyackov2010@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

<sup>3</sup> ООО «Артеб-ресурс»  
Российская Федерация, Красноярск, Дудинская улица, дом 3, офис 101

*В результате анализа стандартных отклонений контролируемых при изготовлении труб в машиностроении, в том числе и при производстве ракетно-космической техники, установлено, что могут возникать отклонения трубопроводов от трассировок, что приводит к дополнительным работам по их переделке.*

*Ключевые слова: машиностроение, трубопроводы, системы, допуски.*

## INFLUENCE OF THE VALUE OF PERMISSIBLE DEVIATIONS OF PIPE DIMENSIONS ON THE QUALITY AND TERMS OF INSTALLATION OF PIPELINES

N. A. Polyakov<sup>1\*</sup>, S. G. Chulkin<sup>1</sup>, S. P. Eresko<sup>2</sup>, D. Y. Terskov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Marine Technical University  
3, Lotsmanskaya Str., 190121, St. Petersburg, Russian Federation  
\*E-mail: nik.polyackov2010@yandex.ru

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup> «Arteb-Resource» LLC  
house 3, office 101, Dudinskaya Str., Krasnoyarsk, Russian Federation,

*As a result of the analysis of standard deviations controlled in the manufacture of pipes in mechanical engineering, including in the production of rocket and space technology, it was found that deviations of pipelines from traces may occur, which leads to additional work on their alteration.*

*Keywords: mechanical engineering, pipelines, systems, tolerances.*

Важнейшими тенденциями в современном машиностроении, в том числе и при производстве ракетно-космической техники, является сокращение сроков выполнения заказов, снижение трудоемкости монтажных работ. Этого невозможно достичь без уменьшения количества брака и переделок трубопроводов или же без уменьшения трудоемкости этих работ.

Известно [2], что на точность монтажа трубопроводов оказывает большое влияние суммарные погрешности их изготовления. Так трубы, изготовленные в допуске по альбому труб, могут не подойти по месту, что приведет к переделкам и увеличению стоимости постройки объекта.

Общие технические требования к технологии изготовления и монтажа трубопроводов представлены в [3].

Стандартами [3,5] регламентируются предельные отклонения размеров труб, от указанных в эскизе не должны превышать:

- для прямых труб  $\pm 3$  мм;
- для гнутых труб диаметром до 100 мм  $\pm 10$  мм;

- для гнутых труб диаметром свыше 100 мм±15 мм;
- отклонения плоскостей фланцев относительно плоскостей плиты и угольников не должно превышать ±0,5 мм на диаметр – уплотнительной поверхности фланца (кольца).

Отклонения трасс трубопроводов от заданных координат представлены в табл. 1, величины отклонения фланцев (колец) от перпендикулярности к оси трубы – в табл. 2.

Таблица 1

**Предельные отклонения трасс трубопроводов от заданных координат, мм**

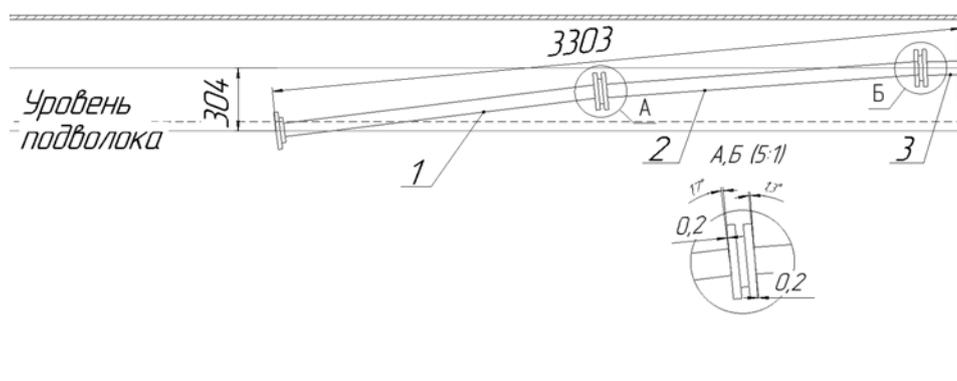
Наименование контролируемых участков	Предельные отклонения
Клапанные коробки, детали крепления арматуры и панелей	±20
Магистраль, групповые ответвления	±30
Ответвления, переключки, обводы	±40

Таблица 2

**Величина допустимых отклонения фланцев (колец) от перпендикулярности к оси трубы, мм**

Условный проход	Величина отклонения от перпендикулярности, не более	
	Соединения встык	Соединения внахлест
До 100 включ.	1,0	2,0
Св. 100 до 200 включ.	2,0	4,0
Св. 200 до 400	3,0	6,0

Рассмотрим к чему могут привести суммарные отклонения упрощенного участка трубопровода, состоящего только из двух труб без погибов и трех фланцевых соединений с наибольшими однонаправленными допустимыми отклонениями (см. рисунок).



Максимальное отклонение, возникающее в фланцевых соединениях

Таким образом, трубопровод может быть изготовлен в допусках, нормированных стандартами [3,5], однако, этого может быть недостаточно для обеспечения необходимой трассировки.

В действующих стандартах регламентируемые отклонения на изготовления труб зависят от их условного прохода, а не от длины трубы, что в некоторых случаях может негативно отразиться на монтаже системы. Однако применение дифференцированных допусков на изготовление труб в зависимости от их длины тоже не даст требуемого результата, т.к. при уменьшении поля допуска, стоимость изготовления трубопровода сильно возрастает, что экономически нецелесообразно.

В данный момент компенсация отклонений изготовления труб производится при помощи забойных труб. В ОСТ 5.95057-90 [3] указано, что для забойных труб должны выбираться конструктивно простые трубы, замыкающие цепочку, однако, чем проще забойная труба (по количеству плоскостей погибов), тем меньше ее компенсирующие свойства. Данный вывод подводит к необходимости разработки и применения компенсирующих элементов, которые при необходимости можно установить в трубное соединение и которые не приведут к увеличению количества сложности конфигураций забойный труб.

### Библиографические ссылки

1. О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений»: постановление правительства Рос. Федерации от 18 окт. 2021г. №1766.
2. Сахно К. Н. Исследование влияния погрешностей изготовления на точность координатных размеров труб сложных судовых технологических комплексов: автореф. дис.канд. техн. наук. СПб.: СПбГМТУ, 2000. 24 с.
3. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. Взамен ОСТ 5.9810-80, ОСТ 5.9190-81. Введен с 01.07.1991 г. [Электронный ресурс]: <http://www.twirpx.com>. (дата обращения 04.05.2021).
4. Микитянский В.В., Сахно К.Н. К вопросу моделирования трубопроводных систем сложных технических комплексов. /Сборник трудов X МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века». Т.2. Донецк: ДонНТУ, 2003. С.248-252.
5. ОСТ 5.0005-81 / РД 5Р.0005-93 / Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. Л.: НПО «Ритм».

### References

1. On Amendments to the State Program of the Russian Federation "Development of Shipbuilding and Equipment for the development of offshore fields": Decree of the Government of the Russian Federation. Federation of October 18, 2021 No. 1766;
2. Sakhno K. N. Investigation of the influence of manufacturing errors on the accuracy of the coordinate dimensions of pipes of complex ship technological complexes: Abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg: SPbGMTU, 2000. 24 p.
3. OST 5.95057-90. Ship systems and systems of ship power plants. Typical technological process of manufacturing and installation of pipelines. Instead of OST 5.9810-80, OST 5.9190-81. Introduced from 01.07.1991 [Electronic resource]: <http://www.twirpx.com>. (accessed 04.05.2021).
4. Mikityansky V.V., Sakhno K.N. On the issue of modeling pipeline systems of complex technical complexes. /Collection of works of the X ISTC "Mechanical engineering and the technosphere of the XXI century". Vol.2. Donetsk: DonNTU, 2003. pp.248-252.
5. OST 5.0005-81 / RD 5R.0005-93 / Ship systems and systems of ship power plants. Requirements for the design, manufacture and installation of pipes according to sketches and drawings with the coordinates of pipeline routes. L.: NPO "Rhythm".

© Поляков Н. А., Чулкин С. Г., Ереско С. П., Терсков Д. Ю., 2022

УДК 629.5.06

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЕНСАТОРОВ ДЛЯ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ

Н. А. Поляков<sup>1\*</sup>, С. Г. Чулкин<sup>1</sup>, С. П. Ереско<sup>2</sup>, Д. Ю. Терсков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
Российская Федерация, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
\*E-mail: nik.polyackov2010@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  
<sup>3</sup>ООО «Артеб-ресурс»

Российская Федерация, Красноярск, Дудинская улица, дом 3, офис 101

*В работе рассмотрена необходимость применения компенсаторов во фланцевых соединениях в машиностроительных, в том числе и ракетно-космических систем. Проведен экономический расчет, который показал эффективность компенсаторного соединения по сравнению с традиционной переделкой труб.*

*Ключевые слова: машиностроение, система, трубопровод, компенсатор, фланец.*

## EFFICIENCY OF APPLICATION OF COMPENSATORS FOR FLANGED PIPELINE JOINTS

N. A. Polyakov<sup>1\*</sup>, S. G. Chulkin<sup>1</sup>, S. P. Eresko<sup>2</sup>, D. Y. Terskov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Marine Technical University  
3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121, Russian Federation  
\*E-mail: nik.polyackov2010@yandex.ru

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
<sup>3</sup>«Arteb-Resource» LLC

house 3, office 101, Dudinskaya Str., Krasnoyarsk, Russian Federation

*The paper considers the need for the use of compensators in flange connections in machine-building, including rocket and space systems. An economic calculation was carried out, which showed the effectiveness of the compensatory connection in comparison with the traditional reworking of pipes.*

*Keywords: mechanical engineering, system, pipeline, compensator, flange.*

Согласно стратегии развития промышленности, утвержденной распоряжением правительства Российской Федерации приоритетной целью, является увеличение в 2,2 раза объема производства современной продукции строения при одновременном росте в 2 раза производительности труда [1]. Данных целей невозможно достичь без уменьшения сроков строительства объектов, которые напрямую связаны с производственными мощностями предприятий и с эффективностью их работы. Значительную период выполнения заказа занимает монтаж судовых систем. Ввиду особенностей технологии изготовления и монтажа систем, корпуса судна и оборудования [2,3], возникает необходимость доработок трубо-проводов или изготовления их по размерам снятым с места, что увеличивает как сроки постройки судна, так и его себестоимость.

Выделим основные ситуации требующие доработки труб: изменение координат оборудования, смещение приварного насыщения при установке (в пределах допуска), пересечение трассировок со смежными системами, изготовление труб с предельными отклонениями [4,5] в допуске регламентируемым стандартами [2,3]. Часть данных отклонений компенсируется забойными трубами замыкаю-

щих ветки систем, однако этого недостаточно для беспрепятственной сборки системы. Для сокращения переделок предлагается разработать фланцевые компенсаторы.

#### Описание конструкции фланцевых компенсаторов:

- Угловой компенсатор (рис. 1) представляет собой диск схожий с фланцем, имеет необходимый угол между своими присоединительными поверхностями.
- Линейный компенсатор схож с угловым, его присоединительные поверхности параллельны друг другу, а компенсация осуществляется за счет толщины компенсатора.

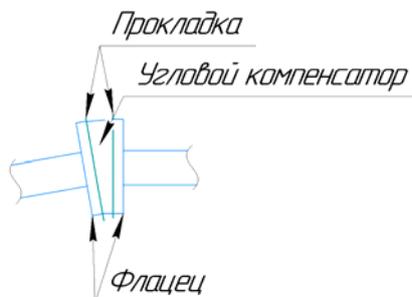


Рис. 1. Схема установки прокладок в соединение

Необходимым условием разработки и применения фланцевых компенсаторов является обоснование их экономической эффективности.

#### Оценка эффективности применения нового компенсаторного соединения.

##### Исходные данные:

Оценить экономическую целесообразность достаточно сложно в данной ситуации т. к. стоимость переделки труб систем в каждом случае зависит от множества факторов, поэтому расчет будет нести приблизительный характер.

Рассмотрим ситуацию, когда в процессе монтажа ветки труб Ду 65 было установлено пересечение со смежной системой, требующей переделки трассируемой трубы с использованием погиба.

#### Сравнительная оценка эффективности применения фланцевых компенсаторов

Сравнение применения технологии компенсаторов и переделки труб в предполагаемой ситуации представлено на рис. 2.

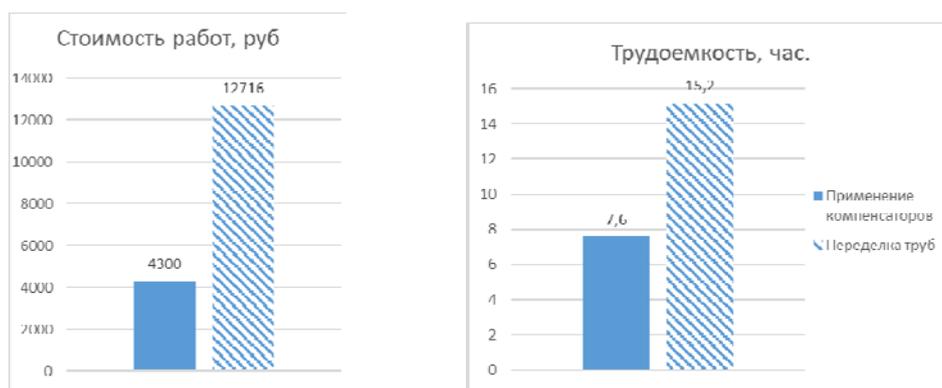


Рис. 2. Сравнение стоимости и трудоемкости переделки труб по сравнению с системой использования компенсаторов

Исходя из расчета, можно сделать вывод, что применение компенсаторов в среднем в два раза выгоднее переделки труб [6,7,8]. Однако в каждом отдельном случае необходимость применения компенсаторов необходимо определять исходя из ситуации. Так с увеличением диаметра трубопровода, а также с применением высоколегированных материалов труб, в случае наличия цинкового покрытия или изоляции, применение компенсаторов становится более выгодным. Если учесть возможность мелкосерийного производства компенсаторов их стоимость заметно снижается, а постоянное наличие компенсаторов всех типоразмеров ускоряет процесс монтажа. Возможна и обратная ситуация, применение компенсаторов не всегда возможна по конструктивным причинам, из-за смежных систем.

Проведен экономический расчет, который показал эффективность компенсаторного соединения по сравнению с традиционной переделкой труб. Предполагаемые затраты финансовые и временные в среднем сокращаются более чем в два раза.

### Библиографический ссылки

1. О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений»: постановление правительства Рос. Федерации от 18 окт. 2021г. №1766;
2. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. Взамен ОСТ 5.9810-80, ОСТ 5.9190-81. Введен с 01.07.1991 г. [Электронный ресурс]: <http://www.twirpx.com>. (дата обращения 04.10.2021).
3. ОСТ 5.0005-81 / РД 5Р.0005-93 / Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. – Л.: НПО «Ритм».
4. Сахно К. Н. Исследование влияния огрешностей изготовления на точность координатных размеров труб сложных судовых технологических комплексов: Автореф. дис.канд. техн. наук. СПб.: СПбГМТУ, 2000. 24 с.
5. Микитянский В.В., Сахно К.Н. К вопросу моделирования трубопроводных систем сложных технических комплексов. /Сборник трудов X МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века». Т.2. Донецк: ДонНТУ, 2003. С. 248-252.
6. ООО "Металлсервис – Москва". Прайс-лист на резку заготовок ленточнопильным станком;
7. Объявление «Первый серийный: корпус готов!»// Корпоративная газета Балтийского завода. 2019 -№11(7472)-23 сентября.
8. Прайс-лист компании ГК «Прочная Сталь» на рубы бесшовные [электронный ресурс]-URL: [https://spb.metallurg-moskva.ru/catalog/by\\_stamp/192/Ст20/](https://spb.metallurg-moskva.ru/catalog/by_stamp/192/Ст20/) -(дата обращения 04.05.2021).

### References

1. On Amendments to the State Program of the Russian Federation "Development of Shipbuilding and Equipment for the development of offshore fields": Decree of the Government of the Russian Federation. Federation of October 18, 2021 No. 1766;
2. OST 5.95057-90. Ship systems and systems of ship power plants. Typical technological process of manufacturing and installation of pipelines. Instead of OST 5.9810-80, OST 5.9190-81. Introduced from 01.07.1991 [Electronic resource]: <http://www.twirpx.com>. (accessed 04.10.2021).
3. OST 5.0005-81 / RD 5R.0005-93 / Ship systems and systems of ship power plants. Requirements for the design, manufacture and installation of pipes according to sketches and drawings with the coordinates of pipeline routes. L.: NPO "Rhythm".
4. Sakhno K. N. Investigation of the influence of manufacturing errors on the accuracy of the coordinate dimensions of pipes of complex ship technological complexes: Abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg: SPbGMTU, 2000. 24 p.
5. Mikityansky V.V., Sakhno K.N. On the issue of modeling pipeline systems of complex technical complexes. /Collection of works of the X ISTC "Mechanical engineering and the technosphere of the XXI century". Vol.2. Donetsk: DonNTU, 2003. p.248-252.
6. ООО "Metallservice – Moscow". Price list for cutting blanks with a band saw.
7. The announcement "The first serial: the case is ready!"// The corporate newspaper of the Baltic Plant. 2019 -No.11(7472)- September 23.
8. Price list of the company GC "Durable Steel" for seamless rubies [electronic resource]-URL: [https://spb.metallurg-moskva.ru/catalog/by\\_stamp/192/Ст20/](https://spb.metallurg-moskva.ru/catalog/by_stamp/192/Ст20/) (accessed 04.05.2021).

УДК 629.015

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ ТРЁХОСНОЙ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

А. В. Стручков<sup>1</sup>, С. П. Ереско<sup>1</sup>, Т. Т. Ереско<sup>1</sup>, Д. Ю. Терсков<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 str-alex-v@mail.ru

<sup>2</sup> ООО «Артеб-ресурс»

Российская Федерация, Красноярск, Дудинская улица, дом 3, офис 101

*В работе дается обоснование и описание методов определения динамической характеристики элементов трансмиссии трёхосной лесотранспортной машины на базе КАМАЗ 65222 – моментов инерции, необходимых для решения математической модели динамики трансмиссионной системы. На основе сравнительной оценки полученных данных делается вывод о достоверности результатов.*

*Ключевые слова: динамическая нагруженность, динамическая крутильная модель, трансмиссионная система, моменты инерции.*

## DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TRANSMISSION ELEMENTS OF A THREE-AXLE TIMBER TRANSPORT MACHINE

A. V. Struchkov\*, S. P. Eresko, T. T. Eresko

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

\*E-mail str-alex-v@mail.ru

<sup>2</sup> «Arteb-Resource» LLC

house 3, office 101, Dudinskaya Str., Krasnoyarsk, Russian Federation

*The work provides a justification and description of methods for determining the dynamic characteristic of the transmission elements of a three-axle timber transport machine based on KAMAZ 65222 – moments of inertia necessary to solve the mathematical model of the dynamics of the transmission system. Based on a comparative assessment of the obtained data, it is concluded that the results are reliable.*

*Keywords: dynamic loading, dynamic torsional model, transmission system, moments of inertia.*

**Введение.** Надежность и долговечность узлов и деталей современных высокоэнергонасыщенных лесотранспортных машин главным образом зависят от динамических нагрузок, возникающих в их элементах трансмиссий. Динамическая нагруженность элементов трансмиссий формируется в результате действия внешних и внутренних возмущающих факторов, которые носят флуктуирующий характер. Различные возбуждающие факторы, а так же неравномерность изменения момента сопротивления внутри трансмиссии вызывают в ней колебания крутящего момента. Спектр частот вынужденных колебаний в механической трансмиссии лесотранспортных машин весьма разнообразна и зависит, главным образом от характера внешних воздействий и конструктивных параметров [1, 2].

Кроме того, не менее разнообразен в трансмиссии и спектр частот свободных колебаний [3,4,5], характер которых определяется параметрами динамической системы.

Динамическая система реальной трансмиссии является очень сложной и трудоемкой для расчетов, имеет множество частот и форм свободных колебаний. При этом наиболее опасными, с точки зрения возникновения резонансных режимов, являются лишь низшие формы свободных колебаний [6,7].

Для исследования динамической нагруженности элементов трансмиссии трёхосной лесотранспортной машины на базе КАМАЗ 65222 с помощью авторской компьютерной программы GIDRO-TRANS – II [8] была разработана динамическая крутильная модель [9] и определены основные динамические параметры элементов, в том числе и моменты инерции. Моменты инерции вращающихся сосредоточенных масс динамической модели трансмиссии исследуемой транспортно-

технологической машины определялись расчетным путем для деталей, имеющих простую геометрическую форму, по общеизвестной методике. Для этого детали условно разбивались на участки постоянного диаметра и отдельно определялись моменты инерции каждого участка по формуле:

$$J = \frac{\pi \cdot \gamma}{32} \cdot l \cdot d^4, \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1)$$

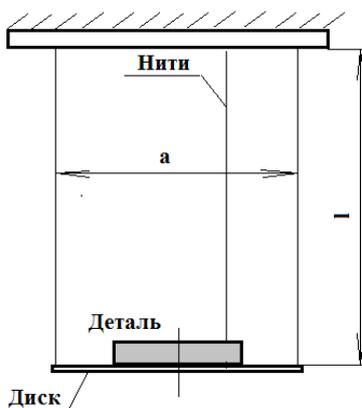
где  $\gamma$  – удельный вес материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $l$  – длина участка, м;  $d$  – диаметр участка, м.

Общий момент инерции детали определялся суммированием моментов инерции отдельных участков [1, 2].

Моменты инерции деталей, имеющих сложную геометрическую форму, определялись экспериментально методом трифилярного подвеса, который заключается в следующем: на высоте 200 см на трех тонких нитях (проводах) подвешивается диск (рис. 2), на диск укладывается испытуемая деталь с максимально возможным совмещением центров вращения, диск закручивается и отпускается, считают количество крутильных колебаний диска за время  $t$ . Расчет момента инерции испытуемой детали определяют по формуле:

$$J = \frac{(G_{\text{деталь}} + G_{\text{диск}}) \cdot a^2 \cdot T^2}{16\pi \cdot l} - \frac{G_{\text{диск}} \cdot a^2 \cdot T^2}{16\pi \cdot l}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2)$$

где  $T = t / K$  – период одного колебания;  $t$  – время эксперимента, сек;  $G_{\text{деталь}}$  – масса детали, кг;  $G_{\text{диск}}$  – масса диска, кг;  $K$  – количество колебаний за время  $t$ .



Определение моментов инерции деталей методом трифилярного подвеса

Трудоемкость расчетов моментов инерции деталей сложной формы достаточно велика, с увеличением сложности расчетов растет и ошибка, поэтому для таких деталей предпочтительнее экспериментальное определение. Приведенное значение момента инерции поступательно движущейся массы машины определялось по формуле [1,2]:

$$J_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{тр}} \cdot r_k^2}{i_{\text{тр}}^2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где  $G_{\text{тр}}$  – вес машины, кг;  $r_k$  – радиус ведущего колеса, м;  $i_{\text{тр}}$  – передаточное число трансмиссии.

Сравнение значений моментов инерции простых деталей, полученных расчетным путем с экспериментальными значениями (см. таблицу) показывает, что расхождение не превышает 4 %. Что дает основание говорить о высокой достоверности полученных результатов.

**Сравнительная оценка значений моментов инерции элементов трансмиссии, полученных расчетным и экспериментальным путем**

Деталь	$J_{\text{теоретич.}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$J_{\text{эксперим.}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	Ошибка, %
Пара шестерен 3 и 4 передач	0,220	0,222	0,89
Пара шестерен 1 и 2 передач	0,175	0,177	1,12
Шестерня 3 передачи	0,394	0,383	3,73
Пара шестерен 2 и 4 передач	0,532	0,522	2,17
Шестерня 1 передачи	0,343	0,338	1,48
Вал первичный в сборе	0,595	0,596	0,17

### Библиографические ссылки

1. Климов А.А., Стручков А.В. Формирование нагрузочных режимов в трансмиссии промышленного трактора./ Монография под общей ред. А. А. Климова. – Красноярск: СибГАУ, 2015. 169 с.
2. Стручков, А. В. Исследование и совершенствование элементов гидромеханической трансмиссии гусеничного бульдозера: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.02.02., 05.05.04. / А. В. Стручков. Красноярск: 2009. – 179 с.
3. Шеховцов, В. В. Анализ и синтез динамических характеристик автотракторных силовых передач и средств для их испытания. / В. В. Шеховцов. – Волгоград: Политехник, 2004. 224 с.
4. Ереско Т.Т., Климов А.А., Стручков А. В. Оптимизация бульдозерного агрегата с учётом вероятностного характера условий эксплуатации [Статья] // Строительные и дорожные машины: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М., 2013, №9. С. 16-19.
5. Стручков, А.В. Экспериментальные исследования крутильной податливости элементов трансмиссии. / А. В. Стручков, Т.Т. Ереско, А. А. Климов // Системы. Методы. Технологии: Научный периодический журнал/ ГОУ ВПО «БрГУ». Братск, 2016. № 1(29) С. 33-39.
6. Климов А.А., Стручков А.В. Экспериментальные исследования динамической нагруженности бульдозерного агрегата. / Монография под общей ред. А. А. Климова. Красноярск: СибГАУ, 2019. 160 с.
7. Ереско С. П. Математическое моделирование динамической нагруженности трансмиссионных систем с учетом диссипативных процессов. / С. П. Ереско, Т.Т. Ереско, А. В. Стручков, А. А. Климов, В. С. Кочкун // Строительные и дорожные машины: Научно-технический и производственный журнал. – М., 2013, №12, С. 32 – 37.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (GYDROTRANS-II) № 2011615364 (РФ) / Ереско С.П., Стручков А.В., Климов А.А., Кочкун В.С., Ереско Т.Т. (РФ); Заявл. 12.05.2011, № 2011613457; Зарегистр. М.: РОСПАТЕНТ 08.07.2011 г.
9. Стручков А.В., Ереско Т.Т. Обоснование динамической колебательной системы трансмиссии трехосных транспортно-технологических машин. / А.В. Стручков, Т.Т. Ереско // Решетневские чтения: материалы XXV Международной научной конференции (10–12 ноября 2021, г. Красноярск). Красноярск: СибГУ, 2021. Ч.1 С.568 –570.

### References

1. 1. Klimov AA, Struchkov A.V. Formation of load modes in the transmission of an industrial tractor ./Monograph under the general editor A. A. Klimov. Krasnoyarsk: SibGAU, 2015. 169 p.
2. Struchkov, A.V. Research and improvement of elements of the hydromechanical transmission of a tracked bulldozer: diss.... cand. techn. techn. sciences.: 05.02.02., 05.05.04 ./A.V. Struchkov. Krasnoyarsk: 2009. 179 s.3.
3. Shekhovtsov, V.V. Analysis and synthesis of dynamic characteristics of automotive tractor power transmissions and means for testing them ./V.V. Shekhovtsov. Volgograd: Polytechnic, 2004. 224 s.
4. Eresko T. T., Klimov A. A., Struchkov A. V. Optimization of the bulldozer unit taking into account the probabilistic nature of the operating conditions [Article] //Construction and road machines: monthly scientific, technical and production journal. M., 2013, No. 9. S. 16-19.5.
5. Struchkov, A.V. Experimental studies of torsional compliance of transmission elements ./A.V. Struchkov, T. T. Eresko, A. A. Klimov//Systems. Methods. Technologies: Scientific periodical journal/SEI HPE "BrSU." Bratsk, 2016. NO. 1 (29) S. 33-39.
6. Klimov AA, Struchkov A.V. Experimental studies of the dynamic loading of a bulldozer unit./ Monograph under the general editor A. A. Klimov. Krasnoyarsk: SibGAU, 2019. 160 s.
7. Eresko S.P. Mathematical modeling of dynamic loading of transmission systems taking into account dissipative processes ./S.P. Eresko, T.T. Eresko, A.V. Struchkov, A.A. Klimov, V.S. Kochkun//Construction and road machines: Scientific, technical and production journal. – M., 2013, NO. 12, S. 32 – 37.
8. Certificate of state registration of the computer program (GYDROTRANS-II) No. 2011615364 (RF) /Eresko S.P., Struchkov A.V., Klimov A.A., Kochkun V.S., Eresko T.T. (RF); Declared. 12.05.2011, № 2011613457; Registered. M.: ROSPATENT 08.07.2011
9. A.V. Struchkov, T.T. Eresko. Justification of the dynamic oscillating transmission system of three-axle transport and technological machines ./A.V. Struchkov, T.T. Eresko//Reshetnevsky readings: materials of the XXV International Scientific Conference (November 10-12, 2021, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk: SibSU, 2021. Ch.1. S.568 -570.



**Секция**

**«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ  
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

## СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК $Mn_5Ge_3$ НА ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ\*

М. А. Бондарев<sup>1,2\*</sup>, М. В. Рауцкий<sup>1</sup>, А. С. Тарасов<sup>1</sup>, И. А. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. «Академгородок», 50

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. «Свободный», 82А

\*E-mail: bondarevmisha99@gmail.com

*Нами были синтезированы эпитаксиальные тонкие пленки  $Mn_5Ge_3$  на подложке Si(111). Были сняты спектры ферромагнитного резонанса в диапазоне температур от 110 К до 330 К. Данные материалы перспективны для применения в электронике, в том числе ракетно-космической.*

*Ключевые слова: тонкие пленки, молекулярно-лучевая эпитаксия, ферромагнитный резонанс.*

## SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF EPITAXIAL $Mn_5Ge_3$ THIN FILMS ON A SILICON SUBSTRATE

M. A. Bondarev<sup>1,2\*</sup>, M. V. Rautskii<sup>1</sup>, A. S. Tarasov<sup>1</sup>, I. A. Yakovlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS  
50, Akademgorodok Str., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
82A, Svobodny prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail: bondarevmisha99@gmail.com

*The  $Mn_5Ge_3$  epitaxial thin films on a Si(111) substrate were synthesized. Ferromagnetic resonance spectra were measured in the temperature range from 110 K to 330 K. These materials are promising for use in electronics, including rocket and space.*

*Keywords: thin films, molecular beam epitaxy, ferromagnetic resonance.*

Ферромагнитные тонкопленочные  $Mn_5Ge_3$  образцы являются перспективными материалами для применения в спинтронике из-за высокой спиновой поляризации и температуры Кюри  $T_C = 296$  К. На сегодняшний день существует ряд работ по получению тонких пленок  $Mn_5Ge_3$  на таких полупроводниковых подложках как Ge [1], GaAs (111), а также на эпитаксиальных буферных слоях Ge [2].

Исследуемые пленки были синтезирована методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111) при температуре  $T = 390$  °С и давлении  $6,5 \times 10^{-8}$  Па с использованием различных буферных слоев. Спектры ферромагнитного резонанса (ФМР) измерялись на спектрометре Bruker Elexsys E580, в диапазоне температур от 110 К до 330 К. Для всех образцов наблюдалась характерная для пленок анизотропия типа легкая плоскость. Типичный вид спектров ФМР представлен на рисунке 1.

Анализ угловых и температурных зависимостей параметров линий ФМР позволил определить оптимальный состав буферного слоя. А также на основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о высоком упорядочении кристаллической оси  $c$  перпендикулярно плоскости подложки, для полученных пленок  $Mn_5Ge_3$ .

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-42-243007. Выражаю благодарность соавторам работы за помощь при проведении данного исследования.

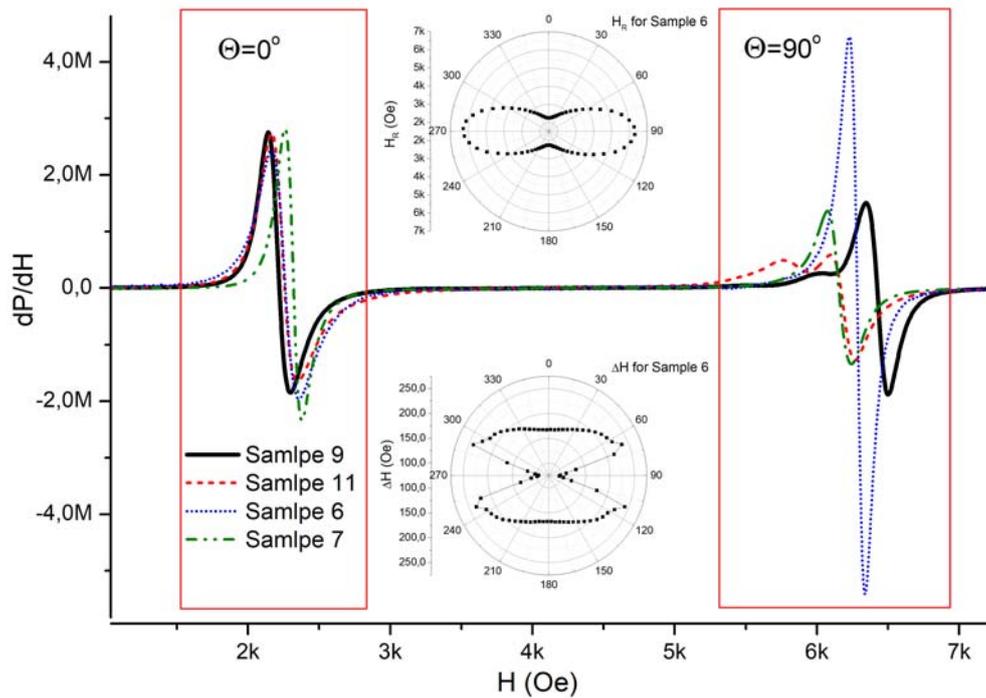


Рис. 1. Спектры ФМР пленок  $Mn_5Ge_3$  при температуре  $T=290$  К в двух ориентациях (На вставке представлены полярные угловые зависимости резонансного поля и ширины линии ФМР для одного из образцов.)

### Библиографические ссылки

1. Spiesser A. et al. Control of magnetic properties of epitaxial  $Mn_5Ge_3C_x$  films induced by carbon doping //Physical Review B. 2011. Т. 84. №. 16. С. 165203.
2. Bechler S. et al. Formation of  $Mn_5Ge_3$  by thermal annealing of evaporated Mn on doped Ge on Si (111) //Semiconductor Science and Technology. 2018. Т. 33. №. 9. С. 095008.

### References

1. Spiesser A. et al. Control of magnetic properties of epitaxial  $Mn_5Ge_3C_x$  films induced by carbon doping //Physical Review B. 2011. Т. 84. №. 16. С. 165203.
2. Bechler S. et al. Formation of  $Mn_5Ge_3$  by thermal annealing of evaporated Mn on doped Ge on Si (111) //Semiconductor Science and Technology. 2018. Т. 33. №. 9. С. 095008.

© Бондарев М. А., Рауцкий М. В., Тарасов А. С., Яковлев И. А., 2022

УДК 669.36

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ ВЫДЕРЖКИ В ВАКУУМЕ МЕТОДОМ СИЛОВОЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

С. В. Воронин, Е. В. Терентьева\*, И. И. Левин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34  
E-mail: \*Terka2502@yandex.ru

*В данной работе исследуется влияние воздействия вакуума и повышенной температуры на геометрические параметры искусственных дефектов поверхности. Объектом исследования являются образцы сплавов М1, АМг6 и Л63, помещённые в среду, имитирующую некоторые условия космического пространства.*

*Ключевые слова: поверхность, царапины, диффузия, вакуум, повышенная температура.*

## INVESTIGATION OF THE SURFACE OF NON-FERROUS METALS AFTER EXPOSURE TO VACUUM BY FORCE PROBE MICROSCOPY

S. V. Voronin, E. B. Terenteva\*, I. I. Levin

Samara National Research University  
34, Moskovskoe shosse Str., Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: \*Terka2502@yandex.ru

*In this paper, the influence of vacuum and elevated temperature on the geometric parameters of artificial surface defects is investigated. The object of the study are samples of M1, AMg6 and L63 alloys placed in an environment simulating some conditions of outer space.*

*Ключевые слова на английском языке: surface, scratches, diffusion, vacuum, elevated temperature.*

Шероховатость поверхности металлических деталей определяет их прочностные и эксплуатационные свойства. Так как существуют материалы, как склонные, так и не склонные к концентраторам напряжения. Шероховатость изделия зависит от количества дефектов на поверхности, к поверхностным дефектам, в том числе относятся и царапины, полученные как при технологических процессах обработки этих деталей, так и в процессе эксплуатации. Уменьшение количества царапин на поверхности изделия позволит повысить чистоту поверхности и соответственно увеличить механические свойства материала.

Одним из способов уменьшения геометрических параметров дефектов является активизация процессов диффузии, позволяющие производить так называемое «залечивание» дефектов [1]. Активизировать диффузионные механизмы возможно при воздействии на материал повышенной температуры в вакууме [2], что является некоторыми условиями космического пространства.

Поэтому целью исследования является влияние вакуума и повышенных температур на процесс изменения геометрических параметров искусственных царапин на поверхности образцов из сплавов М1, АМг6, Л63, как моделирование поведение материалов на земной орбите. Исследуемые образцы подвергались шлифованию и полированию до получения зеркальной поверхности. После механической полировки определялся рельеф поверхности на силовом зондовом микроскопе НаноСкан-3D. На анализируемых участках образцов наносились группы царапин с нагрузкой 45мН и 90мН. Для получения статистически значимых результатов для каждой нагрузки наносилось по 6 царапин. Затем производилось повторное сканирование областей с нанесёнными на них царапинами для снятия геометрических параметров нанесённых дефектов.

Каждая царапина измерялась в 3-х поперечных сечениях, полученные данные усреднялись для каждого усилия, при котором наносились царапины. В дальнейшем образцы помещались в вакуум и подвергались термическому воздействию в вакуумной электропечи сопротивления СВ-1.3.1/20-И1. Образцы нагревались до температуры 450°C и среднем остаточном давлении  $1,3 \cdot 10^{-2}$  мм.рт.ст. в течении 5 часов. После выдержки в вакууме образцы подвергались повторному сканированию на силовом зондовом микроскопе Наноскан-3D. Полученные параметры нанесённых дефектов сравнивались с геометрическими параметрами до воздействия.

В результате проведённых исследований были сделаны следующие выводы. Установлено, что при заданном режиме воздействия происходит увеличение глубины царапин, на поверхности образца М1, на 52%, а для образца АМгб – это значение составляет 18%. Выявлено так же, что происходит уменьшение угла раскрытия царапин, на поверхности образца М1 на 5°, а для образца АМгб – это значение составляет 4°.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выдержку при данной температуре необходимо проводить с большей продолжительностью, так как в течении 5-ти часов и температуре 450 °С происходят только процессы рекристаллизации. Определено, что вся поверхность образца ЛбЗ была разрушена в ходе испарения цинка, в следствии чего корректные данные не могли быть получены.

#### Библиографические ссылки

1. K.G. Swapan Self-healing Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. 291 p.
2. Юшин В.Д., Логвинов А.Н., Чемпинский Л.А. Влияние величины остаточного давления на поверхностную диффузию и микротвердость металлов // Практика тепловой микроскопии: сб. ст. М.: Наука, 1976. С. 54–59.

#### References

1. Swapan K.G. Self-healing Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. 291 p.
2. Yushin V.D., Logvinov A.N., Chempinskiy L.A. Vliyanie velichiny ostatochnogo davleniya na poverkhnostnuyu diffuziyu i mikrotverdost' metallov // Praktika teplovoy mikroskopii: sb. st. M.: Nauka, 1976. S. 54–59.

© Воронин С. В., Терентьева Е. В., Левин И. И., 2022

УДК 620.22

## РОЛЬ МЕТОДА ВВЕДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОСТИ

Е. В. Гребенников, С. Ю. Воронина, М. М. Симунин, О. В. Семенуха

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

*Углеродные нанотрубки (УНТ) в настоящее время рассматриваются как одни из самых перспективных материалов для применения в качестве тензодатчиков, однако серьезной проблемой представляется их равномерное диспергирование в полимере.*

*Ключевые слова: унт, тензорезистивность, методы введения.*

## THE ROLE OF THE CNT INTRODUCTION METHOD ON THE STRAIN-RESISTANCE COEFFICIENT

E. V. Grebennikov, S. Yu. Voronina, M. M. Simunin, O. V. Semenukha

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

*Carbon nanotubes (CNTs) are currently considered as one of the most promising materials for use as strain gauges, but their uniform dispersion in the polymer is a serious problem.*

*Keywords: high boots, tensoresistance, introduction methods.*

Известно, что углеродные наночастицы и нановолокна обладают комплексом уникальных физико-химических свойств и считаются идеальным армирующим материалом для полимеров [1]. Многофункциональные наполнители – углеродные нанотрубки (УНТ) улучшают механические характеристики материала (жесткость, предел прочности при растяжении), повышают электропроводность, увеличивают теплопроводность, теплостойкость и придают нанокомпозиту новые функциональные свойства [2]. Однако серьезной проблемой получения нанокомпозитов является сложность гомогенного распределения УНТ в объеме матрицы и обеспечение стабильной адгезионной связи с ней [3]. Эта проблема обусловлена сильным Ван-дер-ваальсовым взаимодействием УНТ между собой и их склонностью к образованию беспорядочных агрегатов [4].

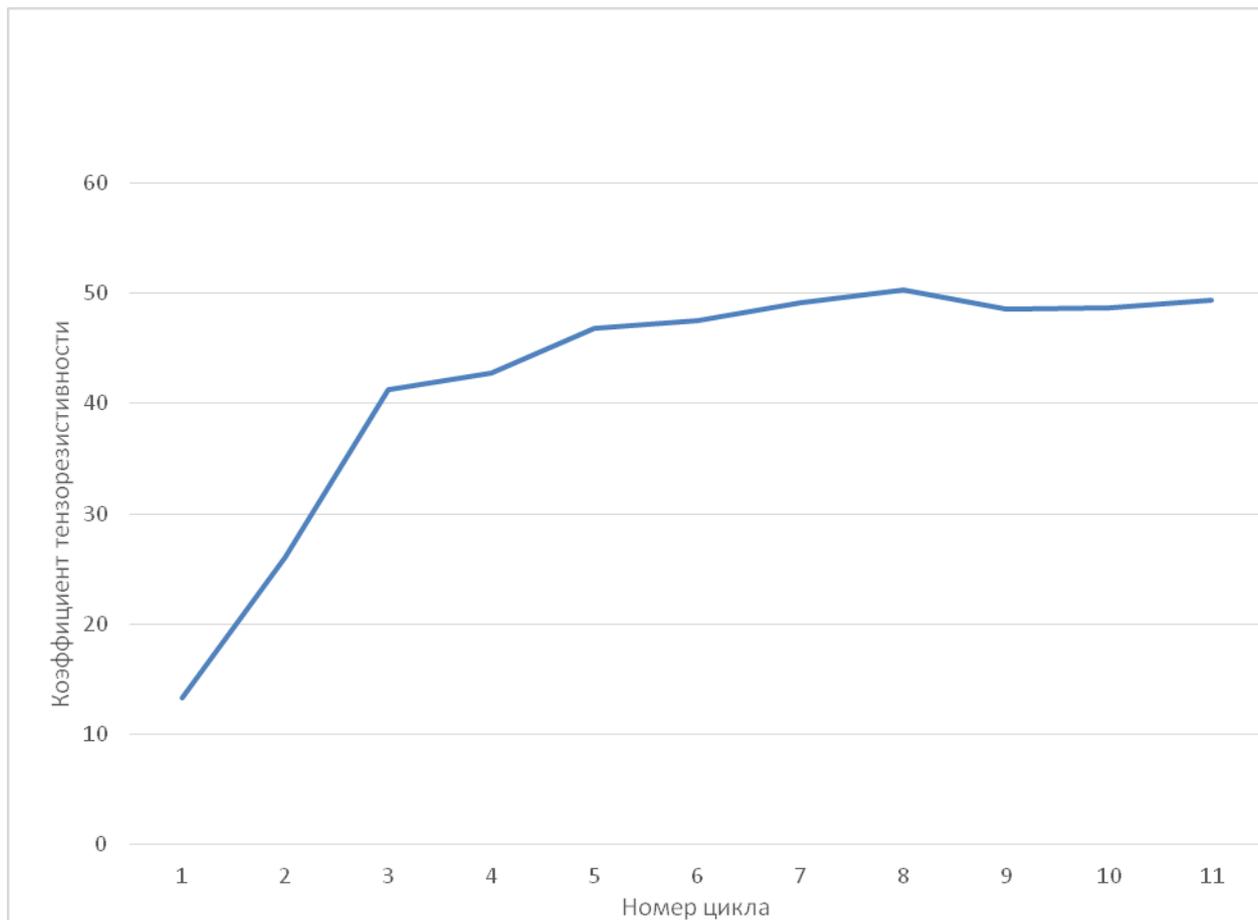
В настоящее время пути получения стабильных нанокомпозитов с диспергированными УНТ в основном применяют метод ультразвукового воздействия. Для эффективного распределения частиц в объеме полимерной матрицы, его часто комбинируют с другими методами диспергирования [5]:

- гибридный метод, состоящий из механического и ультразвукового диспергирования;
- гибридный метод, состоящий из механического и ультразвукового диспергирования с добавлением твердого наполнителя в качестве мелющего агента внутри объема матрицы;
- гибридный метод, состоящий из ультразвукового диспергирования с использованием магнитной мешалки.

Объектами исследования являлись концентрат из УНТ (OCSiAl) и силиконовое связующее Elastosil (WACKER). Оценивание равномерного распределения частиц осуществлялось через измерение сопротивления соответствующим оборудованием с применением программного обеспечения для автоматизации потока данных. Нами были проведены исследования по оценке метода введения УНТ на коэффициент тензорезистивности.

При апробации различных методик введения УНТ в полимерную матрицу, был выбран гибридный метод с помощью мелющего агента как наиболее эффективным и технологически реализуемым методом для диспергирования. Кроме того, значения коэффициента тензорезистивности при добавлении карбида кремния достигают более высоких значений, чем при его отсутствии [6]. В данной работе в качестве агента был использован карбид кремния. Данные по тензорезистивным характеристикам полимерного нанокomпозиционного материала представлены оценке метода введения для ПКМ.

На графике 1 видно, что после третьего цикла деформации на изгиб значение коэффициента тензорезистивности изменяется незначительно и составляет около 45. Процесс выхода на стабильные характеристики материала по сопротивлению наблюдается в течение первых двух циклов. Это можно объяснить разрушением агломератов материала, обеспечивающих повышенные электропроводящие свойства и распределение их остатков в объеме полимерной матрицы. Показано, что распределение УНТ гибридным методом с помощью карбида кремния позволяет получить стабильные тензорезистивные характеристики полимерного нанокomпозиционного материала при циклической деформации.



Исследование тензорезистивных характеристик полимерного нанокomпозиционного материала при циклических нагружениях

### Библиографические ссылки

1. Кузнецов В. А. Электронные транспортные и тензорезистивные свойства композитов с углеродными наноструктурированными материалами и халькогенидов переходных металлов : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2019. 125 с. Журнал "РИТМ машиностроения" № 7-2019
2. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки. // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 9. С. 945.
3. Золотухин И.В. Углеродные нанотрубки. // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 3. С. 111.
4. Ajayan P.M. Nanotubes from Carbon. // Chem. Rev. 1999. V. 99. № 7. P 1787.

5. Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Петрик В.И., Чаплыгин Ю.А. Вольтамперные характеристики двухэлектродных элементов с углеродными нанотрубками // Микроэлектроника. 2003. №2. с. 102-104.
6. Исследование тензорезистивного эффекта силиконового нанокompозита / С. Ю. Воронина, О. В. Семенуха, М. М. Симунин, Т. А. Шалыгина // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения : Материалы XVII Международной научно-практической конференции, П. Эльбрус, 01–10 июля 2021 года. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2021. С. 48.

### References

1. V. A. Kuznetsov, Electronic transport and tensorresistive properties of composites with carbon nanostructured materials and transition metal chalcogenides, Cand. ... cand. tech. Sciences. Novosibirsk, 2019. 125 p. Journal "RITM Engineering" No. 7-2019
2. Eletsky A.V. Carbon nanotubes. // Successes of physical sciences. 1997. V. 167. No. 9. S. 945.
3. Zolotukhin I.V. Carbon nanotubes. // Soros educational journal. 1999. No. 3. S. 111.
4. Ajayan P.M. Nanotubes from Carbon. // Chem. Rev. 1999. V. 99. No. 7. P 1787.
5. Bobrinetsky I.I., Nevolin V.K., Petrik V.I., Chaplygin Yu.A. Volt-ampere characteristics of two-electrode elements with carbon nanotubes // Microelectronics. 2003. No. 2. With. 102-104.
6. Voronina S. Yu., Semenukha O. V., Simunin M. M., Shalygina T. A. Study of the tensorresistive effect of a silicone nanocomposite // New polymer composite materials. Mikitaev Readings: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, P. Elbrus, July 01–10, 2021. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University. HM. Berbekova, 2021. P. 48.

© Гребенников Е. В., Воронина С. Ю., Симунин М. М., Семенуха О. В., 2022

УДК 539.431

## ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПРОДОЛЬНОМУ СЖАТИЮ ТОНКОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

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 изучению продольного сжатия тонкого упругого стержня, для изучения его физических свойств.*

*Ключевые слова: стержень, балка, продольное сжатие, изгиб.*

## EXPERIMENT ON LONGITUDINAL COMPRESSION OF A THIN ELASTIC ROD

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 on the study of the longitudinal compression of a thin elastic rod, to study its physical properties.*

*Keywords: rod, beam, longitudinal compression, bending.*

### **Введение.**

Для и без того активно развивающейся и модифицирующейся сферы МКА, требуются новые антенные комплексы, а также различные комплексы развёртывания того или иного оборудования на орбите, включая полезную нагрузку, ради которой запуски спутников и производятся. Актуальность сохраняется и для наземной деятельности ввиду того что в инженерии балки являются общими элементами многих архитектурных, гражданских и машиностроительных сооружений. Анализ изгиба и потери устойчивости прямых балок при комбинированных нагрузках занимает важное и существенное место в широкой области механики материалов и строительной механики [1]. Кроме того, композитные материалы, применяются во всевозможных сферах деятельности, и изучение различных физических свойств имеет явные перспективы [2].

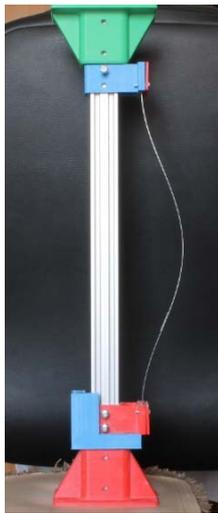
### **Проведение эксперимента с тонким упругим стержнем на экспериментальной установке.**

В качестве экспериментального образца использовалась тонкая прямоугольная стальная полоса из стали 3. В ходе работы провёл эксперимент, по продольному изгибу стержня, для изучения геометрически-нелинейного изгиба. Далее на рисунке 1 (б) представлен график со всем набором изгибов при сближении концов стержня.

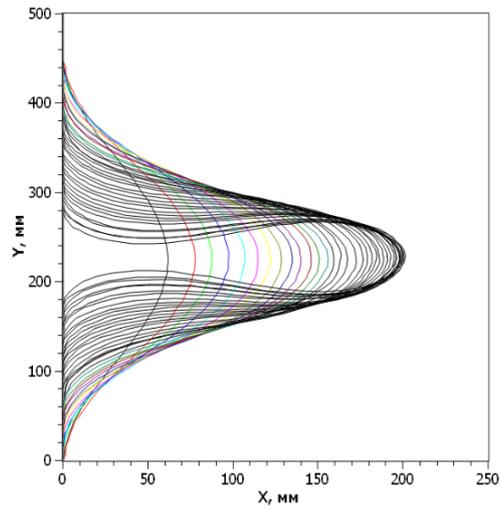
Для анализа полученных результатов построил график максимального прогиба от расстояния между концами, который представлен на рисунке 2 (а) параметр  $\Delta x$  – это параметр сближения концов стержня. Полученный график наглядно демонстрирует геометрически-нелинейную природу изгиба.

Резкий скачок из нуля обусловлен тем, что размеры установки меньше размеров стержня и помещая стержень в рабочее пространство, сразу получается изгиб ввиду сближения концов.

Далее используя экспериментальные данные из схожего опыта [3] построил график зависимости приложенного напряжения от сближения, предварительно избавившись от привязки к размерности данных. На рисунке 2 (б) приведены графики экспериментальных зависимостей перемещения  $\Delta x$  концевой точки при различных закреплениях концов стержня от величины силы  $G$ . Под цифрой 3, отмечен тип закрепления заделка-заделка, как и в проводимом нами эксперименте. На рисунке 3 График зависимости приложенного напряжения от сближения.

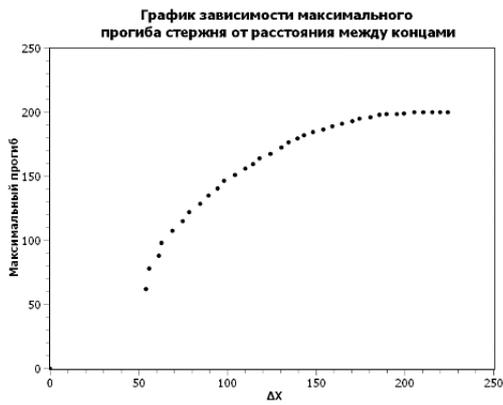


а

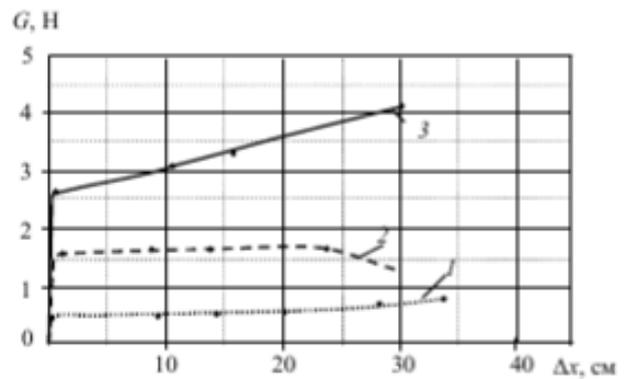


б

Рис. 1. а) Экспериментальная установка, б) Набор изгибов



а



б

Рис. 2. а) График экспериментальной зависимости максимально прогиба от сближения концов, б) График экспериментальных зависимостей

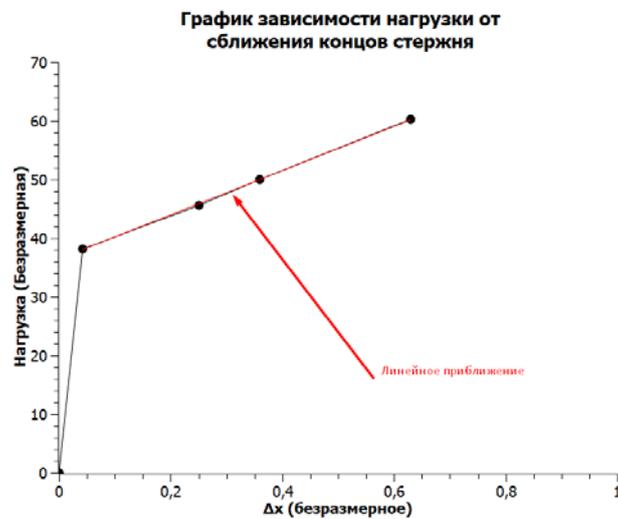


Рис. 3. График зависимости приложенного напряжения от сближения

**Заключение.** Проведён эксперимент с продольно-поперечным изгибом стержня, так же получены формы изгиба, зависимость максимального прогиба от перемещения  $\Delta x$  концевой точки при типе закрепления концов “заделка-заделка”. На основе литературных экспериментальных данных отождествлена нагрузка для испытываемого в эксперименте стального стержня, сделан вывод, что при наибольшем сжатии, на стержень оказывалась нагрузка порядка 4-5 Н. Получены кривые зависимости приложенного напряжения от сближения, кривая экспериментальной зависимости максимального прогиба от сближения концов.

#### Библиографические ссылки

1. Коробейников, С. Н. Нелинейное деформирование твёрдых тел : учебное пособие / С. Н. Коробейников ; СО РАН. Москва : 2000. Текст : электронный.
2. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов : учебное пособие / Ю. Н. Работнов ; Издательство “Наука” главная редакция физико-математической литературы. Москва : 1963. Текст : электронный.
3. Личковаха, А. С. Исследование деформации стержня большой гибкости при осевом нагружении : учебное пособие / Б. А. Шемшура, С. А. Кузнецов ; Известие вузов, Северо-Кавказский регион, Технические науки. Пятигорск : 2016. Текст : электронный.

#### References

1. Korobeynikov, S. N. Nelineinoe deformirovanie tverdykh tel: uchebnoe posobie / S. N. Korobeynikov ; SO RAN. Moskva : 2000. Text : elektronnij.
2. Rabotnov, Y. N. Soprotivlenie materialov : uchebnoe posobie / Y. N. Rabornov ; Izdatelstvo “Nauka” glavnaj redakcia fiziko-matematicheskoy lliteraturi. Moskva : 1963. Text : elektronnij.
3. Lichkovakha, A. S. Issledovanie deformacii sterjnia bolshoj gibkosti pri osevom nagrushenii : uchebnoe posobie / B. A. Shemshura, S. A. Kuznetsov ; Izvestie vuzov, Severo-Kavkazskij region, Tehniceskie nauki. Pyatigorsk : 2016. Text : elektronnij.

© Карпов Е. С., 2022

УДК 629.7.023.22

## НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПОРОШКИ В СОСТАВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. В. Купряшов\*, 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 различных наноразмерных порошков в составе композиций современных многофункциональных покрытий, используемых в космической и авиаракетной технике.*

*Ключевые слова: многофункциональное покрытие, нанопорошок, теплозащита, поглощение электромагнитного излучения, летательный аппарат.*

## NANOSCALE POWDERS AS PART OF MULTIFUNCTIONAL COATINGS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

A. V. Kupriashov\*, 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 the useful application of various nanoscale powders as part of compositions of modern multifunctional coatings used in space and aircraft technology.*

*Keywords: multifunctional coating, nanopowder, heat protection, absorption of electromagnetic radiation, aircraft.*

В последнее время возрос интерес к получению и внедрению в состав композиций многофункциональных покрытий ракетно-космической технике различных нанопорошков. Нанопорошок – это твердое вещество искусственного происхождения, состоящее из нанообъектов, агрегатов и агломератов нанообъектов, либо разных вариации их смеси, при этом размер всех частиц менее 100 нм [1].

Среди нанообъектов распространение в качестве наполнителей многофункциональных покрытий ракетно-космической техники получили наносульфат бария, углеродные нанотрубки, наночастицы оксида кремния и диоксида титана [2, 3].

Известен состав композиции покрытия с сочетанием частиц наносульфата бария, наночастиц диоксида титана и микроразмерной графеновой пульпы полезно используется в антикоррозионных теплостойких аэрокосмических покрытиях [4]. Представлен примерный состав таких мультифункциональных покрытий: 27÷45% эпоксидной смолы, 6÷10% отвердителя эпоксидной смолы на водной основе, 0.5÷1% диспергатора, 0.3÷0.6% пеногасителя, 10÷14% растворителя, 2÷4% водного фосфата цинка, 1÷10% наносульфата бария, 2÷6% наночастиц диоксида титана, 0.3÷0.5% органобентонита, 0.5÷0.8% коллоидального диоксида кремния, 20÷36% цинкового порошка, 10÷13% графеновой пульпы. Полученное покрытие имеет высокую коррозионную стойкость, химическую стойкость, ударную вязкость, устойчивость к холодным и горячим рабочим циклам и способность нанесения большого количества слоёв.

Китайские инженеры из компании «Qingdao Xuanwei Coating Material Co Ltd» в составе радиопоглощающих покрытий используют углеродные нанотрубки. Покрытие состоит из [5]: 40÷60% гидроксилакриловой смолы, 10÷15% углеродных нанотрубок, 5÷10% керамического порошка, 5÷8% микростеклосфер, 1÷5% силоксанового связующего агента, 1÷10% наноразмерного сульфата бария,

1÷10% наноразмерного диоксида титана, 5÷10% смеси диметилбензола и бутилацетата. Полученное радиопоглощающее покрытие обладает высокой способностью поглощать волны, малой поверхностной плотностью и малой массой.

Наносульфат бария активно применяется в составе радиационно-стойких высокотемпературных покрытиях совместно с наночастицами оксида кремния [6], оксида железа [7], диоксида титана. В изобретении [8] представлен состав покрытия с наполнителем состоящем в равных долях из наносульфата бария, наночастиц диоксида кремния, а также диоксида титана. Данное покрытие обладает высокой отражательной способностью. Результат диффузного отражения падающих лучей достигается из-за большой разницы показателей преломления между наночастицами диоксида кремния и диоксида титана. Установлено что вследствие такой пропорции содержания компонентов наполнителя эффект диффузного отражения дополнительно увеличивается [9].

Наносульфат бария входит в состав множества наполнителей защитных материалов и покрытий, так как он придаёт материалам особые электроизоляционные и упрочняющие свойства, коррозионную и эрозионную стойкость, термостойкие характеристики. Наполнитель из смеси наносульфата бария, углеродных нанотрубок и стеклянных микросфер применяется в составе изоляционного, радиозащитного покрытия радиоаппаратуры спутника от электромагнитного и других видов негативных излучений [10].

Результаты проведённого анализа, показали, что применение наполнителей, содержащих наноразмерные порошки способствует повышению основных свойств и функциональных характеристик многофункциональных покрытий.

#### Библиографические ссылки

1. Luan W.-L., Gao L., Guo J.-K. Study on drying stage of nanoscale powder preparation // *Nanostructured materials*, 1998. Vol. 10, Is. 7. P. 1119-1125.
2. Алехина Р. А., Славкина В. Э. Обзор физико-механических характеристик полиуретановых нанокompозитов // *Известия ВолгГТУ*. 2021. № 12 (259). С. 23-31.
3. Kwon Y.-S., Gromov A. A., Strokova J. I. Passivation of the surface of aluminum nanopowders by protective coatings of the different chemical origin // *Applied surface science*, 2007. Vol. 253, Is. 12. P. 5558-5564.
4. Пат. 109943202 (А) КНР, МПК С09D 163/10, С09D 5/10. Прочное антикоррозионное покрытие из эпоксидных нановолокон на водной основе и способ его получения / Цзян Ю., Рэн М. № 201810440756; заявл. 10.05.2018, опубл. 11.02.2019.
5. Пат. 103013256 (А) КНР, МПК С09D 133/00, С09D 7/12. Материал невидимого покрытия и способ его получения / Шаосянь Л., Гуанцзюнь Л. № 201210564239; заявл. 24.12.2012; опубл. 03.04.2013.
6. Mikhailov M. M., Neshchimenko V. V., Yuryev S. A., Grigorevsky A. V., Lovitskiy A. A., Vashchenkov I. S. On the Radiation Stability of BaSO<sub>4</sub> Pigment Modified with SiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Applied for Spacecraft Thermal Control Coatings // *Defect and Diffusion Forum*, 2018. Vol. 386. P. 277-282.
7. Пат. 106046992 (А) КНР, МПК С09D 127/12, С09D 133/00. Защитное покрытие на водной основе и способ его приготовления / Гауэнь З. № 201610629250; заявл. 01.08.2016; опубл. 26.10.2016.
8. Пат. 110256888 (А) КНР, МПК С09D 133/00, С09D 163/00. Диффузионно-отражающее покрытие с высокой отражательной способностью, способ его получения и устройство / Нинь З., Джинья Х., Лехуа Л. № 201910535764; заявл. 20.06.2019; опубл. 20.09.2019.
9. Dywel P., Chorobinski M., Szczesny R., Domanowski P., Skowronski L. The enhanced light diffuse reflection of laser marking Al substrate for the back reflector purpose // *Optics and Laser Technology*, 2021. Vol. 144. Article number 107371.
10. Пат. 108517142 (А) КНР, МПК С09D 133/00, С09D 5/25, С09D 7/61. Способ получения изоляционного покрытия, применяемого в электротехнике / Пэйфэнь Ц., Руйпенгъ Ц., Янь Д. № 201810370606; заявл. 24.04.2018; опубл. 11.09.2018.

#### References

1. Luan W.-L., Gao L., Guo J.-K. Study on drying stage of nanoscale powder preparation. *Nanostructured materials*. 1998. Vol. 10, Is. 7. P. 1119-1125.
2. Alekhina R. A., Slavkina V. E. Review of the physical and mechanical characteristics of polyurethane nanocomposites. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2021. No 12 (259). P. 23-31.

3. Kwon Y.-S., Gromov A. A., Strokova J. I. Passivation of the surface of aluminum nanopowders by protective coatings of the different chemical origin. *Applied surface science*. 2007. Vol. 253. Is. 12. P. 5558-5564.
4. Jiang Y., Ren M. Waterborne epoxy nano fiber heavy anti-corrosion coating and preparation method thereof. Patent China, no. 109943202 (A), appl. 10.05.2018, publ. 11.02.2019.
5. Shaoxiang L., Guangjun L. Invisible coating material and preparation method thereof. Patent China, no. 103013256 (A), appl. 24.12.2012, publ. 03.04.2013.
6. Mikhailov M. M., Neshchimenko V. V., Yuryev S. A., Grigorevsky A. V., Lovitskiy A. A., Vashchenkov I. S. On the Radiation Stability of BaSO<sub>4</sub> Pigment Modified with SiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Applied for Spacecraft Thermal Control Coatings. *Defect and Diffusion Forum*. 2018. Vol. 386. P. 277-282.
7. Guowen Z. Protective water-borne coating and preparation method thereof. Patent China, no. 106046992 (A), appl. 01.08.2016, publ. 26.10.2016.
8. Ning Z., Jinya H., Lehua L. Diffuse reflection coating with high reflectivity, preparation method thereof and reflective device. Patent China, no. 110256888 (A), appl. 20.06.2019, publ. 20.09.2019.
9. Dywel P., Chorobinski M., Szczesny R., Domanowski P., Skowronski L. The enhanced light diffuse reflection of laser marking Al substrate for the back reflector purpose. *Optics and Laser Technology*. 2021. Vol. 144. Article number 107371.
10. Peifeng C., Ruipeng C., Yan Z. Preparation method of insulation coating used in electrical equipment. Patent China, no. 108517142 (A), appl. 24.04.2018, publ. 11.09.2018.

© Купряшов А. В., Пронин А. В., Шестаков И. Я., 2022

УДК 621.315.592.2

## ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В. С. Куценко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: kvtsenko.valya01@mail.ru

*Представлена методика экспериментального исследования на орбите, представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) солнечного элемента в зависимости от угла освещенности и в условиях ионизирующего излучения, отработанные на раннее созданном имитаторе солнечного излучения (ИСИ).*

*Приведены графики, полученные в ходе исследования (ВАХ) и их сравнительный анализ.*

*Ключевые слова: методика, вольт-амперная характеристика, угол освещенности, ионизирующее излучение, фотоэлектрический преобразователь, летный эксперимент.*

## TEST PROCEDURE FOR MEASURING VOLTAGE-AMPERE CHARACTERISTIC OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS FOR FLIGHT EXPERIMENT

V. S. Kutsenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: kvtsenko.valya01@mail.ru

*Presents the methodology of experimental research in orbit, presents the results of the study of the voltage-ampere characteristics (VAC) of the solar cell depending on the illumination angle and under ionizing radiation conditions, developed on an early created solar radiation simulator (SRS).*

*Plots of the obtained during the study (BAC) and their comparative analysis are given.*

*Keywords: solar radiation simulator, radiation source, reflector, requirements, photoelectric converter, flight experiment.*

**Введение.** Дegradaция солнечных панелей – это актуальная проблема спутникостроения, которая сводит работу многих спутников к неудовлетворительному рабочему временному промежутку [1]. Снизив на какой-то порядок величину деградации, возможно увеличить сроки службы космических миссий. Степень деградации электрофизических характеристик солнечных батарей существенно зависит от физических параметров на орбите [2]. Одними из важных факторов, влияющих на стабильность выходных характеристик солнечных элементов являются температура, угол освещенности и ионизирующее излучение.

**Методика экспериментального исследования на орбите.** Для реализации опытов по определению ВАХ солнечных элементов, модуль полезной нагрузки будет проводить эксперимент в трех режимах: 1. Режим изменения угла освещенности; 2. Режим изменения температуры; 3. Режим облучения электронами. В режиме изменения угла освещенности космическому аппарату будет необходимо совершить поворот. В исходном положении модуль полезной нагрузки спутника будет ориентирован под углом  $90^\circ$  относительно направления на Солнце. Далее, модуль полезной нагрузки будет ориентироваться под углами  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $0^\circ$  относительно направления на Солнце (рис. 1).

Во время маневра для предварительно заданных значений угла положения Солнца будут собираться соответствующие значения тока короткого замыкания, который соответствует минимальному значению напряжения. В режиме облучения электронами будет собираться набор точек ВАХ до и после облучения [3]. По измеренным ВАХ определяются следующие параметры: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальный КПД. Далее, будут построены графики зависимости тока от напряжения до и после облучения, и сравнение значений исследуемых параметров.

Данная методика эксперимента была отработана на ранее созданном функциональном прототипе имитатора солнечного излучения.

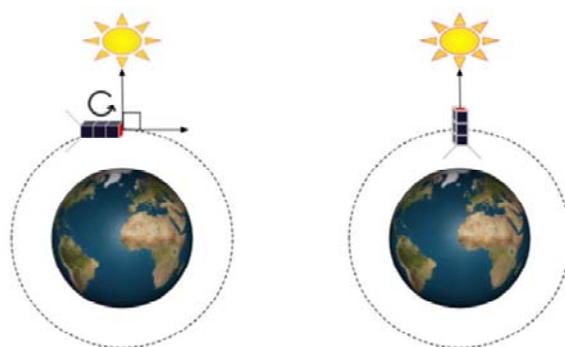


Рис. 1. Схематичное представление начального и конечного положения КА в режиме изменения угла освещенности

**Результаты эксперимента.** В режиме изменения угла освещенности провела 4 измерения тока короткого замыкания для углов от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом в  $30^\circ$  и одно дополнительное измерение для  $45^\circ$ . Построила график зависимости тока короткого замыкания при разных углах поворота ФЭП:

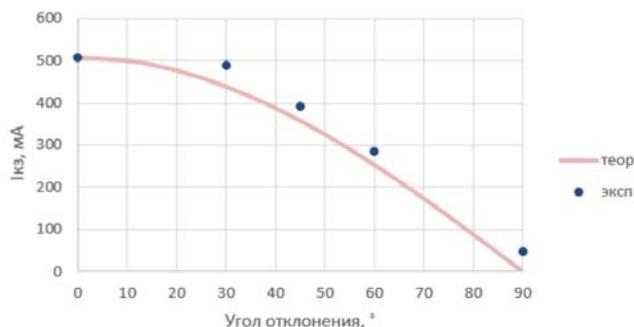


Рис. 2. Экспериментальная и теоретическая зависимость  $I_{кз}$  от угла наклона ФЭП

В качестве экспериментального образца использовался фотопреобразователь – поликристаллический кремний площадью  $S = 30 \times 40 \text{ мм}^2$ . По результатам этого опыта видно, что ток короткого замыкания образца изменятся относительно ориентации ФЭП на Солнце. При увеличении угла поворота ФЭП ток короткого замыкания значительно уменьшается. В режиме облучения электронами был собран набор точек ВАХ до и после облучения (рис. 3). Образец облучался 7 дней радиоактивным элементом Стронций – 90 + Иттрий – 90.

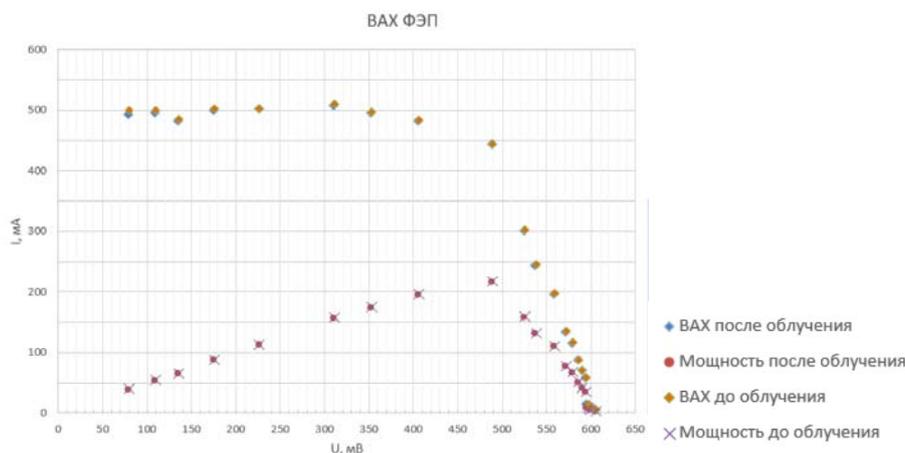


Рис. 3. ВАХ до и после облучения на одном графике

**Заключение.** В режиме изменения угла освещенности при увеличении угла поворота ФЭП, ток короткого замыкания значительно уменьшается. При облучении образца радиоактивным элементом электрические параметры ФЭП уменьшаются. Ток короткого замыкания уменьшился на 2-3 мА, напряжение холостого хода на 1-2 мВ. В результате, это приводит к заметному уменьшению доступного максимума мощности и, в свою очередь, уменьшению КПД образца. При большем времени облучения, например, 2 года, КПД снизится в разы больше, что говорит о том, что при эксплуатации на околоземной орбите на солнечных элементах должны использоваться кварцевые или стеклянные пластины толщиной 0,1-3 мм в качестве защитного покрытия.

#### **Библиографические ссылки**

1. Летин В. А. Функционирование солнечных батарей в космической среде: Модель космоса. № 2(8), с. 568-571, 2007.
2. Афанасьев, В. П. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.
3. Вологдин, Э. Н. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. М. : МГИЭМ, 1999. 98 с.

#### **References**

1. Letin V. A. Funkcionirovanie solnechnyh batarej v kosmicheskoy srede: Model' kosmosa. № 2(8), s. 568-571, 2007.
2. Afanas'ev, V. P. Tonkoplenochnye solnechnye elementy na osnove kremniya / V. P. Afanas'ev, E. I. Terukov, A. A. SHERchenkov // SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2011. 168 s.
3. Vologdin, E. N. Integral'nye radiacionnye izmeneniya parametrov poluprovodnikovyh materialov / E. N. Vologdin, A. P. Lysenko. M. : MGIEM, 1999. 98 s.

© Куценко В. С., 2022

УДК 551.521.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ПОЛЯРНОЙ ОРБИТЕ

Ал. В. Овчинников, С. В. Телегин, А. А. Типцова\*

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

*В статье описаны предварительные расчёты и методика эксперимента по исследованию радиационной обстановки на полярной орбите с помощью датчиков, снабженных набором фильтров.*

*Ключевые слова: поглощенная доза, защитное покрытие, орбита спутников, полярная орбита.*

## INVESTIGATION OF THE RADIATION SITUATION IN POLAR ORBIT

Al. V. Ovchinnikov, S. V. Telegin, A. A. Tiptsova\*

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

*The article describes preliminary calculations and experimental methodology for studying the radiation situation in polar orbit using sensors equipped with a set of filters.*

*Keywords: absorbed dose, protective coating, satellite orbit, polar orbit.*

В процессе эксплуатации космические аппараты (КА) подвергаются воздействию ионизирующего излучения космического пространства, в частности протонов и электронов солнечных космических лучей. В условиях высокой радиационной нагрузки элементная база постепенно деградирует, что приводит к уменьшению срока службы КА. Набирает актуальность вопрос разработки методов радиационной защиты для космических аппаратов и изучения эффективности новых материалов и конструкций радиационно-защитных фильтров. В случае запуска устройства на орбиту, намного выгоднее использовать уже существующие и стандартизированные устройства и защитить их от пагубного влияния радиации с помощью системы фильтров, чем разрабатывать устройства с использованием элементной базы космического класса. С целью изучения радиационной обстановки на орбите и разработки материалов, эффективно защищающих от заряженных частиц, предлагается провести эксперимент на базе российского летательного аппарата RechUCub с помощью автономного экспериментального модуля.

Наше исследование ставит перед собой следующие задачи:

- моделирование прохождения через фильтр потока заряженных частиц;
- выбор на основе полученных данных наиболее эффективных материалов и конструкций защитных экранов для снижения массовых характеристик экранов при сохранении ослабляющих свойств;
- разработка и проведение эксперимента на базе RechUCub;
- получение спектров ионизирующего излучения после прохождения через радиационные фильтры и оценка радиационной обстановки на выбранной орбите.

В рамках данной работы будет рассмотрена полярная орбита. Она имеет наклонение к плоскости экватора в  $90^\circ$ , высоту 400 км и относится к группе Кеплеровских орбит. Именно по этой орбите проходит RechUCub. Её трасса пересекает все широты Земли и охватывает область полярных шапок, что даёт наиболее полную картину радиационной обстановки и в частности над Россией. Прохождение орбиты через полюса означает, что на датчики будет попадать более жёсткий поток первичного излучения. Это позволит изучить влияние тяжёлых радиационных условий на приборы. Также немало-

важно, что движение по этой орбите позволит получить полную карту поглощаемой дозы от координат на всей территории России.

Оценка поглощённой дозы проводится с использованием программного обеспечения PCLab [1]. Данная программа позволяет оценить дозу, поглощаемую фильтрами из заданного материала, как функцию от массовой толщины. Производится симуляция потока заряженных частиц, проходящего через исследуемый материал. Частично, результаты моделирования представлены на графиках, изображённых на рисунках 1 и 2.

Основываясь на полученных результатах, мы задаем энергетический спектр потока частиц и определяем минимальную толщину фильтра для датчиков, которая будет пропускать радиационное излучение, допустимое для функционирования электроники [2-4].

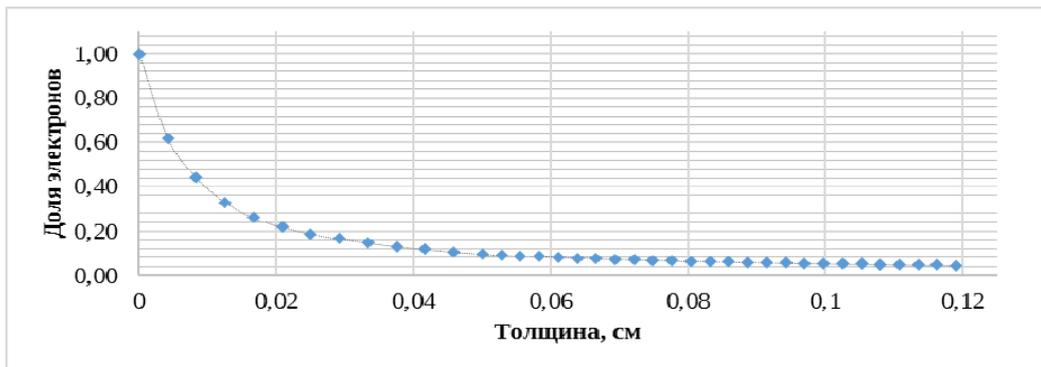


Рис. 1. Доля протонов, прошедших через фильтр заданной толщины

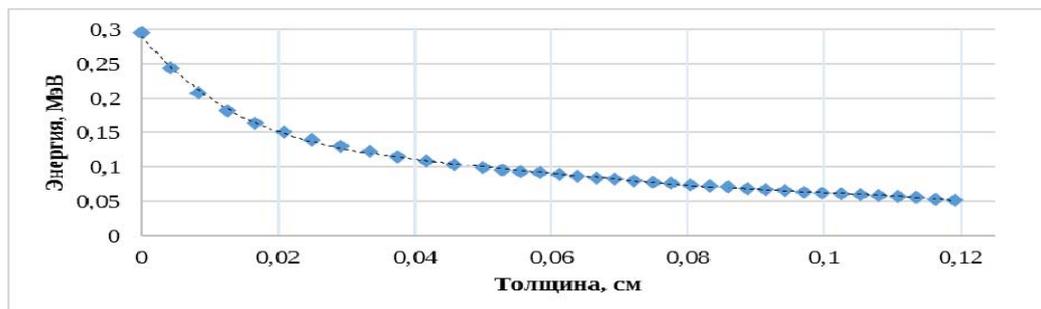


Рис. 2. Зависимость энергии частиц от толщины экрана

На основе полученных данных были сделаны фильтры, установленные на дозиметрах кубсата ReshUCub1. Спутник запущен 9 августа 2022 г. В предлагаемом нами исследовании всего будет шесть датчиков, поверх которых будут установлены фильтры той же массовой толщины, что и у уже установленных на спутнике. Основным материалом послужит сплав алюминия Амг-6, два фильтра будут однослойные, ещё три многослойные, их основа выполнена из алюминия, на стороны который нанесены два дополнительных слоя: смесь карбид бора с эпоксидной смолой и сплава ПОС40. Один датчик будет без фильтра, как контрольный.

Предполагается, что экспериментальный модуль должен быть установлен на внешней поверхности космического аппарата. В процессе проведения эксперимента с некоторой периодичностью будут проводиться измерения спектров ионизирующих излучений со всех детекторов одновременно. Для одного цикла измерения требуется накопление данных в течение 2-10 минут со всех детекторов. Частота может меняться в зависимости от исследуемой зоны. Период между измерениями будет определен позднее (несколько раз за один виток). Предполагаемая длительность проведения эксперимента: один месяц.

Полученные результаты будут использованы для разработки конструкции радиационных экранов с более высокими защитными свойствами, а также построения карт зависимости поглощённой дозы от координаты.

### Библиографические ссылки

1. КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ [КЛ/PCLab]: Program for Monte Carlo simulation of charged particle propagation processes / developer: Bepalov Valeriy Ivanovich Tomsk : TPU FTI dep. Applied Physics, 2018. 1 CD-ROM. (1C: Electronic distribution). Zagl. With title screen. Electronic program: electronic.
2. Таперо В. И. Развитие методов расчётно-экспериментального моделирования радиационных эффектов при проектировании и испытаниях радиационно-стойких изделий электронной техники космического применения. /Акционерное общество «научно-исследовательский институт приборов», 2017. 63 с.
3. Моделирование радиационных условий проектируемой группировки малых спутников для радиационного мониторинга / М. И. Панасюк, М. В. Подзолко, А. С. Ковтюх и др. // Космические исследования 2016. № 6 (54). С. 451-455.
4. Jean-Marie Lauenstein and Janet L. Barth, Radiation Belt Modeling for Spacecraft Design: Model Comparisons for Common Orbits. [Электронный ресурс] URL: [https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/NSREC05\\_W16.pdf](https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/NSREC05_W16.pdf) (дата обращения: 26.03.2022).
5. Роскосмос : официальный сайт. Москва . URL: <https://www.roscosmos.ru/38069/> (дата обращения: 09.06.2022) Текст : электронный

### References

1. PCLab: Program for Monte Carlo simulation of charged particle propagation processes and developer: Bepalov Valeriy Ivanovich. Tomsk, TPU FTI dep. Applied Physics, 2018. 1 CD-ROM. (1C: Electronic distribution). From the title screen. Electronic program: electronic
2. Tapero V. I. *Razvitie metodov raschetno-eksperimental'nogo modelirovaniya radiatsionnykh effektiv pri proektirovanii i ispytaniyakh radiatsionno-stoykikh izdeliy elektronnoy tekhniki kosmicheskogo primeneniya*. [Development of methods for computational and experimental modeling of radiation effects in the design and testing of radiation-resistant products of electronic equipment for space applications.]. Lyikarino, Aktsionernoe obshchestvo «nauchno-issledovatel'skiy institut priborov», 2017. 63 с.
3. Panasyuk M. I., Podzolko M. V., Kovtyukh A. S. [Modeling of radiation conditions of the projected constellation of small satellites for radiation monitoring.] *Modelirovanie radiatsionnykh usloviy proektiruемой gruppировки malyykh sputnikov dlya radiatsionnogo monitoringa*. 2016, №6 (In Russ.). Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_27148162\\_14442269.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_27148162_14442269.pdf) (accessed 22.08.2022)
4. Lauenstein J. M., Janet L. B., Radiation Belt Modeling for Spacecraft Design: Model Comparisons for Common Orbits. 2005, *Living With a Star Targeted Research and Technology*. Available at: [https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/NSREC05\\_W16.pdf](https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/NSREC05_W16.pdf)
5. Roscosmos *Rossiya zapustila v kosmos sputnik dlya Irana* [Russia launches satellite for Iran] (In Russ.). Available at: <https://www.roscosmos.ru/38069/> (access: 06.09.2022)

© Овчинников Ал. В., Телегин С. В., Типцова А. А., 2022

УДК 539.21:537.86

## ИМПЕДАНС И ИНДУКТИВНОСТЬ В ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$

М. Н. Ситников\*, А. М. Харьков, 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: kineru@mail.ru

*Импеданс и индуктивность в твердых растворах  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  измерены на фиксированных частотах в диапазоне от 1 кГц до 300 кГц в зависимости от температуры. Найдены максимумы импеданса по температуре. Емкостный вклад в реактивную часть импеданса установлен для концентрации  $x=0,05$ . Обнаружены спинстекольные состояния ниже температуры Нееля.*

*Ключевые слова: импеданс, индуктивность, полупроводники.*

## IMPEDANCE AND INDUCTANCE IN $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ SOLID SOLUTIONS

M. N. Sitnikov\*, A. M. Kharkov, N. A. Cheremnykh, O. S. Nikitinskiy

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

*The impedance and inductance in  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solutions were measured at fixed frequencies in the range from 1 kHz to 300 kHz, depending on temperature. The temperature impedance maxima are found. The capacitive contribution to the reactive part of the impedance is set for a concentration of  $x = 0.05$ . Spin-sticole states below the Neel temperature were detected.*

*Keywords: semiconductors, impedance, inductance.*

Поиск новых материалов для микроэлектроники является актуальной задачей. В качестве перспективных материалов изучаются халькогениды марганца [1] и манганиты [2] с колоссальным магнитосопротивлением. Не ковалентное замещение приводит к неоднородному распределению электрического заряда в образце. В результате тип проводимости меняется с омической на моттовскую или Пул-Френкелевскую. Орбитальное упорядочение вызывает анизотропию обменных взаимодействий и приводит к изменению магнитных характеристик. Спин-орбитальное взаимодействие в топологических изоляторах приводит к гигантскому магнитосопротивлению [3]. При низких концентрациях замещения избыточный заряд частично компенсируется дырками, и в полупроводниках возникает волна плотности заряда. В переменном электрическом поле смещение электрических зарядов может не совпадать по фазе с внешним полем.

Импеданс и составляющие импеданса измерялись на приборе компонентного анализатора АМ-3028 в диапазоне частот  $100\text{--}10^6$  Гц. Импеданс уменьшается с увеличением частоты в соответствии со степенным законом. Чтобы установить корреляцию с диэлектрическими характеристиками, рис. 1 показаны нормализованные значения импеданса, измеренные при  $T=178\text{K}$  (рис. 1а). По мере повышения температуры импеданс увеличивается и проходит через максимум. Ширина максимума уменьшается с увеличением частоты, поэтому при  $\omega = 1$  кГц она составляет приблизительно 200К, а при 300 кГц она сужается до 20К.

Максимальное значение увеличивается до 50 кГц, а затем постепенно уменьшается. Максимальная температура смещается с увеличением частоты в сторону высоких температур от  $T=250\text{K}$  при  $\omega = 1$  кГц до 450К при 300 кГц. Импеданс состоит из активной (R) и реактивной (X) частей сопротивления. На рис. 1б показано нормированное значение реактивной части  $X(T)/X(T=178\text{K})$  температуры. Температурные зависимости импеданса и реактивной части практически совпадают и незначительно от-

личаются по величине. Это указывает на то, что импеданс  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $x=0,05$  определяется реактивным сопротивлением, т.е. индуктивный или емкостный вклад.

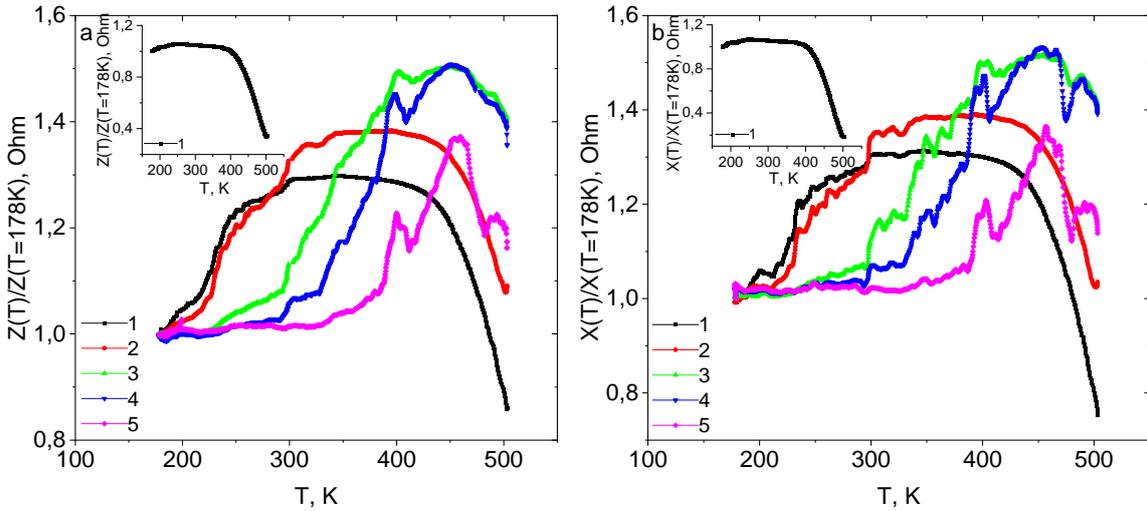


Рис. 1. (a) – нормированный импеданс  $Z(T)/Z(T=178\text{ K})$  на частотах  $\omega = 5\text{ кГц}$  (1),  $10\text{ кГц}$  (2),  $50\text{ кГц}$  (3),  $100\text{ кГц}$  (4),  $300\text{ кГц}$  (5) для  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $x = 0,05$ . Вставка: при  $\omega = 1\text{ кГц}$ . (b) – нормированное реактивное сопротивление  $X(T)/X(T=178\text{ K})$  на частотах  $\omega = 5\text{ кГц}$  (1),  $10\text{ кГц}$  (2),  $50\text{ кГц}$  (3),  $100\text{ кГц}$  (4),  $300\text{ кГц}$  (5) для  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $x = 0,05$ . Вставка: при  $\omega = 1\text{ кГц}$

Индуктивный вклад связан с магнитным потоком  $\Phi=BS$ , где  $B$  – магнитная индукция,  $S$  – площадь. Была измерена индуктивность катушки с медным проводом, внутри которой находится образец [4]. Были проведены два измерения, измерена индуктивность катушки с образцом, охлажденным без магнитного поля и в магнитном поле  $12\text{ КЭ}$ . Было определено влияние предыстории от действия магнитного поля. При нагревании индуктивность в обоих случаях измерялась без внешнего поля. Влияние охлаждения в магнитном поле на образцы  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  показано на рис. 2.

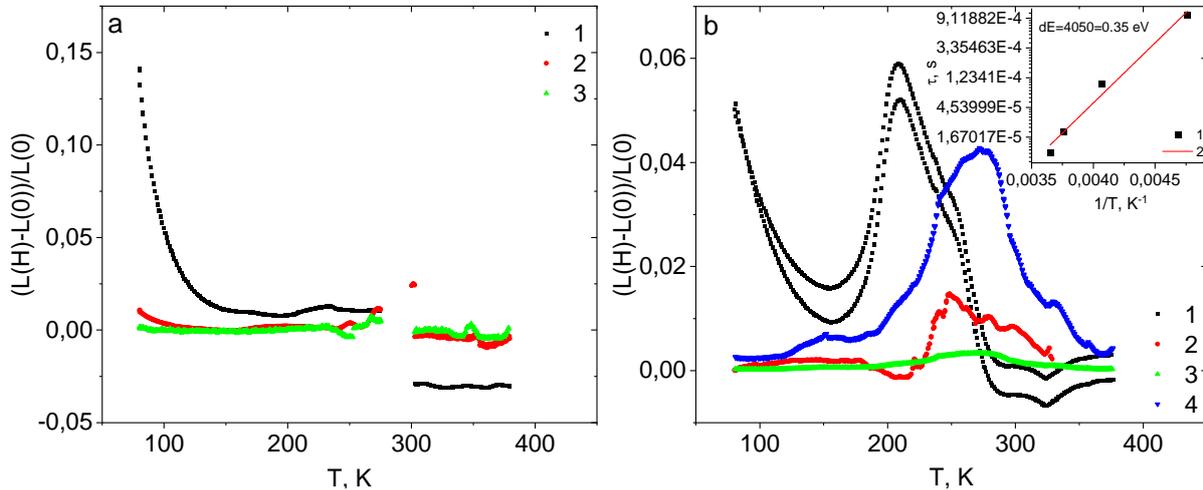


Рис. 2. Температурная зависимость относительного изменения индуктивности катушки, охлаждаемой в нулевом поле  $L(0)$  и в магнитном поле  $12\text{ kOe } L(H)$ , (a) –  $(L(H)-L(0))/L(0)$  для  $\text{Ho}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  при частоты  $\omega = 1\text{ кГц}$  (1),  $5\text{ кГц}$  (2),  $10\text{ кГц}$  (3); и (b) –  $(L(H)-L(0))/L(0)$  для  $\text{Ho}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  на частотах  $\omega = 1\text{ кГц}$  (1),  $10\text{ кГц}$  (2),  $50\text{ кГц}$  (3),  $100\text{ кГц}$  (4). Вставка: зависимость времени релаксации от обратной температуры

При малых концентрациях ниже температуры магнитного фазового перехода наблюдается увеличение индуктивности образца  $\text{Ho}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$ , что вызвано изменением магнитного состояния при охлаждении в магнитном поле. Типичное состояние для спиновых стекол [5]. Для  $\text{Ho}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  в диапазоне температур  $200\text{--}300\text{ K}$  изменение индуктивности  $(L(H)-L(0))/L(0)$  проходит через максимум, температура которого с увеличением частоты смещается в область высоких температур (рис. 2b). Воз-

можно, это связано с образованием орбитального стекла, температура замерзания которого зависит от температуры. Время релаксации подчиняется закону Аррениуса (вставка на рис. 2b) с энергией активации  $\Delta E=0,35$  эВ.

В твердом растворе  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  основной вклад в импеданс вносит реактивная часть, которая состоит из индуктивного и емкостного вклада. При концентрации  $x=0,05$  реактивная часть импеданса обусловлена емкостью. Максимумы температурной зависимости реактивной части связаны с минимумом диэлектрических потерь.

### Библиографические ссылки

1. Magnetotransport effects in paramagnetic  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov // JETP Lett. 2014. V. 100 (2). P. 95-101.
2. Room-Temperature Low-Field Colossal Magnetoresistance in Double-Perovskite Manganite / S. Yamada, N. Abe, H. Sagayama, K. Ogawa, T. Yamagami and T. Arima // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123. P. 126602.
3. Huge magnetoresistance in topological insulator spin-valves at room temperature / P. Tseng, J. W. Chen, W. J. Hsueh. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 11717.
4. Enhancement of the magnetocapacitance effect in an external electric field in  $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  films / S. S. Aplesnin, V. V. Kretinin, A. M. Panasevich and K. I. Yanushkevich // JETP. 2015. V. 121(3). P. 422.
5. Influence of the crystal structure on the magnetic phase diagram of disordered magnets / G. A. Petrakovskii and S. S. Aplesnin // Phys. Met. Metallog. 1990. V. 70 (1). P. 193-195.

### References

1. Magnetotransport effects in paramagnetic  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov // JETP Lett. 2014. V. 100 (2). P. 95-101.
2. Room-Temperature Low-Field Colossal Magnetoresistance in Double-Perovskite Manganite / S. Yamada, N. Abe, H. Sagayama, K. Ogawa, T. Yamagami and T. Arima // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123. P. 126602.
3. Huge magnetoresistance in topological insulator spin-valves at room temperature / P. Tseng, J. W. Chen, W. J. Hsueh. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 11717.
4. Enhancement of the magnetocapacitance effect in an external electric field in  $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  films / S. S. Aplesnin, V. V. Kretinin, A. M. Panasevich and K. I. Yanushkevich // JETP. 2015. V. 121(3). P. 422.
5. Influence of the crystal structure on the magnetic phase diagram of disordered magnets / G. A. Petrakovskii and S. S. Aplesnin // Phys. Met. Metallog. 1990. V. 70 (1). P. 193-195.

© Ситников М. Н., Харьков А. М., Черемных Н. А., Никитинский О. С., 2022

УДК 538.955

## АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $Mn_5Ge_3$ ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ SI(111)

И. А. Соболев<sup>1</sup>, М. В. Рауцкий<sup>2\*</sup>, И. А. Яковлев<sup>2</sup>, С. Н. Варнаков<sup>2</sup>, А. С. Тарасов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

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

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/38

\*E-mail: rmv@iph.krasn.ru

*В настоящей работе представлены исследования эффекта Холла и удельного сопротивления тонких пленок  $Mn_5Ge_3$ , выращенных на кремниевых подложках. Полученные результаты указывают на высокое качество полученных пленок. Удельное сопротивление пленок при температуре 3 К составляет 18 мкОм×см, что меньше по сравнению с пленками, выращенными на других подложках. Всё это делает пленки  $Mn_5Ge_3$  перспективными для внедрения в кремниевую электронику.*

*Ключевые слова: сопротивление Холла, аномальный эффект Холла, удельное сопротивление пленок, гистерезис.*

## ANOMALOUS HALL EFFECT IN EPITAXIAL $Mn_5Ge_3$ THIN FILMS GROWN ON SI(111) SUBSTRATES

I. A. Sobolev<sup>1</sup>, M. V. Rautskii<sup>2\*</sup>, I. A. Yakovlev<sup>2</sup>, S. N. Varnakov<sup>2</sup>, A. S. Tarasov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

50/38, Akademgorodok Str., Krasnoyarsk 660036, Russian Federation

\*E-mail : rmv@iph.krasn.ru

*This work shows study of the Hall effect and resistivity of  $Mn_5Ge_3$  thin films grown on silicon substrates. The result indicates the high quality of the obtained films. The resistivity of the films at 3 K is 18  $\mu\text{Ohm}\times\text{cm}$ , which is less than films grown on other substrates All this makes the films promising for implementation in silicon electronics.*

*Keywords: Hall resistance, anomalous Hall effect, resistivity of the films, hysteresis.*

Интерметаллический германид марганца проявляет ферромагнетизм с высокими температурой Кюри (296 К) и спиновой поляризацией (42%). Ферромагнитные германиды являются перспективными для спинтроники из-за возможной их интеграции в полупроводниковую электронику и комплексную технологию метал-оксид-полупроводник (КМОП-технологии) [1].  $Mn_5Ge_3$  также является интересным материалом для разработки новых устройств спинтроники в качестве многообещающего материала для электрической инжекции спин-поляризованных носителей в полупроводник. Большинство исследований о  $Mn_5Ge_3$ , найденных в литературе, сообщают о его росте на подложках Ge или GaAs [2-3]. Однако современная полупроводниковая технология основана на кремнии, в связи с чем, на наш взгляд, гибридные структуры  $Mn_5Ge_3/Si$  более интересны.

В данной работе изучался аномальный эффект Холла тонких пленок  $Mn_5Ge_3$  на подложке Si(111). Данный образец получен на установке МЛЭ «Ангара» [4] путем эпитаксиального роста на подложке p-Si(111) при температуре  $T=390$  °С и давлении  $6,5\times 10^{-8}$  Па.

На рис. 1а представлено сопротивление Холла при температуре  $T=80$  К. В полях, близких к насыщению, наблюдается гистерезис. Этот эффект обусловлен тем, что противоположно намагниченный домен должен иметь определенный минимальный размер для образования стабильной конфигурации.

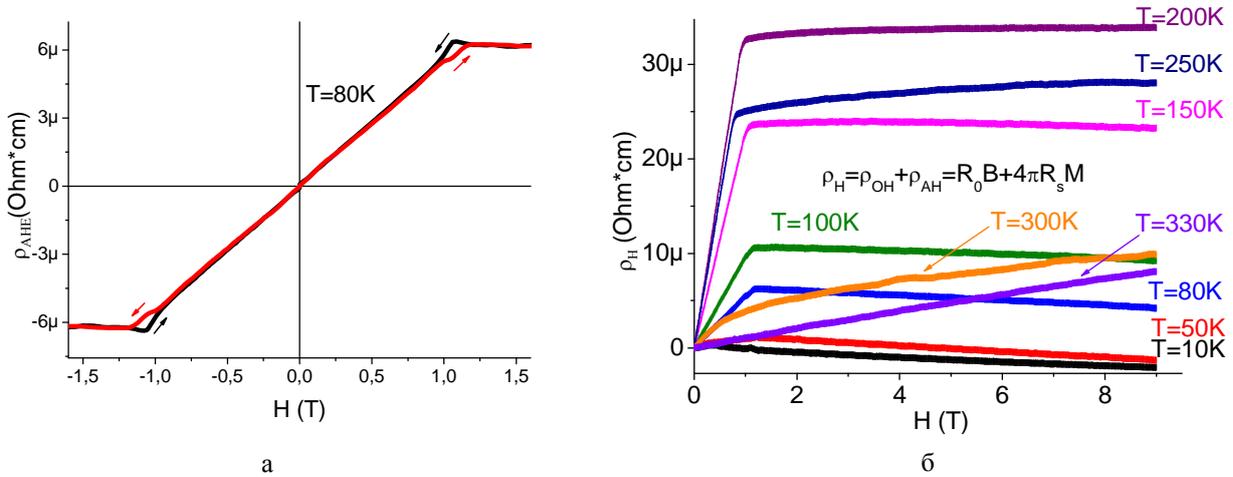


Рис. 1. Полевые зависимости:  
 а) аномального сопротивления Холла;  
 б) сопротивления Холла при различных температурах

На рис. 1б наблюдается немонотонная зависимость сопротивления Холла от температуры. Это обусловлено квадратичной зависимостью сопротивления Холла от обычного сопротивления и немонотонной зависимостью сопротивления от температуры (рис. 2). Вероятно, это происходит из-за того, что подложка при высоких температурах является проводящей и шунтирует пленку. При температуре  $T=3$  К, где влияние подложки минимально, сопротивление пленки составляет  $18 \text{ мкОм} \times \text{см}$ , что хорошо согласуется с данными [5] и указывает на высокое качество пленок. Дополнительно, около температуры Кюри наблюдается аномалия, которая хорошо видна на зависимости  $d\rho/dT$  (рис. 2б).

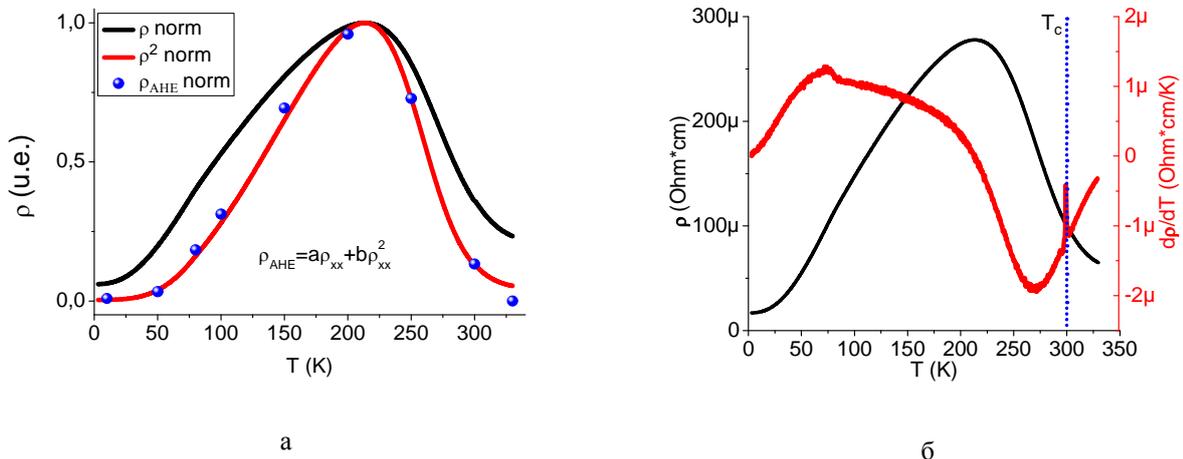


Рис. 2. Температурные зависимости:  
 а) аномального сопротивления Холла; б) удельного сопротивления пленки

Мы исследовали эффект Холла и удельное сопротивление ферромагнитных пленок  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ . Аномальный эффект Холла и аномалия на температурной зависимости  $\rho$  подтверждают образование ферромагнитного слоя с температурой Кюри  $300$  К. Низкое удельное сопротивление при  $3\text{К}$  ( $18 \text{ мкОм} \times \text{см}$ ) и наблюдаемый гистерезис сопротивления Холла в магнитных полях вблизи поля насыщения указывают на высокое качество пленки  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ . Это позволяет надеяться на использование этого материала в кремниевой спинтронике.

### Библиографические ссылки

1. Zhou Y. et al. Electrical spin injection and transport in germanium //Physical Review B. 2011. Vol. 84. No. 12. P. 125323.
2. Olive-Mendez S. et al. Epitaxial growth of Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>/Ge (111) heterostructures for spin injection // Thin Solid Films. 2008. Vol. 517. No. 1. P. 191-196.
3. de Oliveira R. C. et al. Magnetic and structural properties of Mn<sub>5+x</sub>Ge<sub>3+y</sub> thin films as a function of substrate orientation //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021. Vol. 539. P. 168325.
4. Варнаков С. Н. и др. Автоматизация технологического оборудования для получения многослойных структур в сверхвысоком вакууме //Приборы и техника эксперимента. 2004. №. 6. С. 125-129.
5. Sürgers C. et al. Magnetotransport in ferromagnetic Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>C<sub>0.8</sub>, and Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>C<sub>0.8</sub> thin films //Physical Review B. 2014. Vol. 90. No. 10. P. 104421.

### References

1. Zhou Y. et al. Electrical spin injection and transport in germanium Physical Review B. 2011. vol. 84. no. 12. p. 125323.
2. Olive-Mendez S. et al. Epitaxial growth of Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>/Ge (111) heterostructures for spin injection Thin Solid Films. 2008. vol. 517. no. 1. p. 191-196.
3. de Oliveira R. C. et al. Magnetic and structural properties of Mn<sub>5+x</sub>Ge<sub>3+y</sub> thin films as a function of substrate orientation Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021. vol. 539. p. 168325.
4. Varnakov S. N. et al. *Avtomatizaciya tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya polucheniya mnogoslojnyh struktur v sverhvysokom vakuume* [Automation of technological equipment for obtaining multilayer structures in an ultrahigh vacuum]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques]. 2004. vol. 47. no. 6. p. 839-843.
5. Sürgers C. et al. Magnetotransport in ferromagnetic Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>C<sub>0.8</sub>, and Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>C<sub>0.8</sub> thin films Physical Review B. 2014. vol. 90. no. 10. p. 104421.

© Соболев И. А., Рауцкий М. В., Яковлев И. А., Варнаков С. Н., Тарасов А. С., 2022

УДК 539.21:537.86

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ \*

А. М. Харьков\*, М. Н. Ситников, А. В. Гельгорн, Р. В. Рунов

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

*Исследована электрическая поляризация от напряженности электрического поля в интервале температур 80 – 300 К на образцах  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ . Найден гистерезис из полевой зависимости поляризации и вычислена ширина гистерезиса без поля и в магнитном поле 12 кЭ.*

*Ключевые слова: полупроводники, поляризация, гистерезис.*

## ELECTRICAL POLARIZATION IN $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$

A. M. Kharkov\*, M. N. Sitnikov, A. V. Gelgorn, R. V. Runov

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

*The electric polarization from the electric field strength in the temperature range of 80-300 K was studied on  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  samples. The hysteresis is found from the field dependence of polarization and the width of the hysteresis without a field and in a magnetic field of 12 kOe is calculated.*

*Keywords: semiconductors, polarization, hysteresis.*

Полупроводники с электронными и магнитными фазовыми переходами, как по температуре, так и по концентрации, являются перспективными материалами для создания элементной базы микроэлектроники.

Управлять транспортом носителей тока можно как за счет заряда электрона, так и магнитного момента, при наличии взаимодействия между электронами и орбитальными магнитными моментами [1, 2].

Для создания электрически неоднородных состояний в сульфиде марганца ион марганца замещается трехвалентным ионом лютеция.

Электрическая поляризация от поля определялась из электрического заряда, измеренного на электрометре Keithley 6517В во внешнем переменном электрическом поле  $E = E_0 \sin(\omega t)$  с частотой  $\omega = 0,01$  Гц без поля и в магнитном поле 12 кЭ по три цикла [3]. Полевые зависимости поляризации  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  обнаруживают гистерезис (рис. 1а), ширина которого дана на рис. 1б. Гистерезис исчезает в интервале 280-320 К. При приближении к критической температуре исчезновения электрической поляризации проявляются токи утечки.

Гистерезис и электрическую поляризацию вычислили в модели локализованных дырок и электронов, соответственно на внешней и внутренней стороне домена Lu-Mn. Локализованные электроны дают линейный вклад в поляризацию  $P = \epsilon_0 \chi E$ . Во внешнем электрическом поле перескок дырок между потенциальными ямами с подвижностью  $\mu$  индуцирует ток и миграционную электронную поляризацию.

Ширина гистерезиса  $\Delta P = 2en\mu E_0$  определяется концентрацией и подвижностью дырок, участвующих во внешнем экранировании LuS кластеров.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-620.2021.1.2.

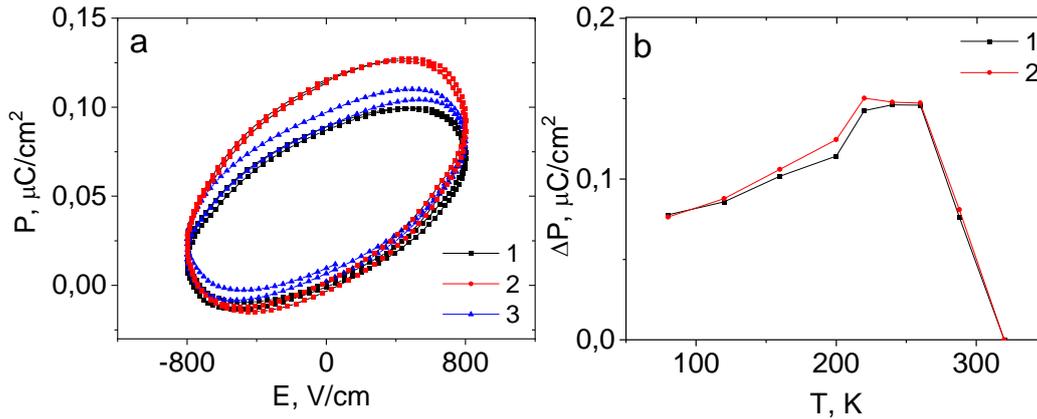


Рис. 1. (а) – Электрическая поляризация  $P$  от напряженности электрического поля  $E$  для  $x = 0.05$ , при  $T = 120$  К (1), 200 К (2), 290 К (3). (б) – Ширина гистерезиса поляризации  $\Delta P$  от температуры  $T$  для  $x = 0.05$ ,  $H = 0$  (1) и  $H = 12$  кЭ (2)

Результирующая поляризация имеет вид:

$$P = \frac{en\mu\sqrt{E_0^2 - E^2}}{\omega} + \sigma_0 + \varepsilon_0\chi E.$$

Вычисленная зависимость поляризации от поля удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Ниже 240 К гистерезис не зависит от количества циклов измерений  $P(E)$ . В области протекания ионов лутеция по решетке ( $X_{\text{per}} = 0.17$ ) для концентраций  $x = 0.2$  образуются домены, содержащие ионы лутеция. Электронная плотность на доменных границах возрастает, что приводит к росту гистерезиса. Статическая диэлектрическая восприимчивость  $\chi = P/\varepsilon_0 E$ , определенная в электрическом поле 800  $\text{V}/\text{cm}$ , возрастает при нагревании и обнаруживает максимум в области комнатной температуры.

Замещение марганца лутецием приводит к электрически неоднородным состояниям с локализацией дырок и поляронов в окрестности границы кластеров (доменов) сульфида лутеция. Частичная делокализация дырок на внешней стороне кластера во внешнем электрическом поле приводит к электрической поляризации, к смещению петли электрического гистерезиса, к росту диэлектрической проницаемости и увеличению рассеяния носителей тока в области комнатных температур и к экспоненциальному уменьшению подвижности носителей тока.

В парамагнитной области установлено уменьшение сопротивления в магнитном поле, вызванное изменением индуцированной электрической поляризации кластеров (доменов) с лутецием в магнитном поле [4, 5].

### Библиографические ссылки

1. Magnetoimpedance, Jahn-Teller transitions upon electron doping of manganese sulfide // S.S. Aplesnin, M.N. Sitnikov, A.M. Kharkov, S.O. Kononov, A.M. Vorotinov / JMMM., 2020. V. 513. P. 167104.
2. Magneto-resistive effect in  $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  at small concentration / A.M. Kharkov, H. Abdelbaki, A.V. Gelgorn, N.A. Cheremnykh // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. V. 1230. P. 012008.
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, 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  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  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. 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.
2. Kharkov A.M., Abdelbaki H., Gelgorn A.V., Cheremnykh N.A. [Magnetoresistive effect in  $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  at small concentration]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2022, Vol. 1230, P. 012008.
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  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution]. *Phys. Status Solidi B*, 2019, Vol. 256, P. 1900043.
4. Kharkov A.M., Sitnikov M.N., Begisheva O.B., 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  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  Compound]. *Phys. Status Solidi B*, 2022, Vol. 259, P. 2100555.

© Харьков А. М., Ситников М. Н., Гельгорн А. В., Рунов Р. В., 2022

УДК 620.3

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ

А. А. Ходыкина, О. В. Корчевская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 8902952405@mail.ru

*Рассмотрено современное состояние и перспективы развития нанотехнологий в России. Особое внимание уделено применению нанотехнологии в аэрокосмической отрасли.*

*Ключевые слова: нанотехнологии, наноматериалы, аэрокосмическая отрасль, космические аппараты, исследования, наноструктура.*

## STATE AND PROSPECTS OF NANOTECHNOLOGY DEVELOPMENT IN RUSSIA

A. A. Khodykina, O. V. Korchevskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 8902952405@mail.ru

*The current state and prospects of nanotechnology development in Russia are considered. Particular attention is paid to the application of nanotechnology in the aerospace industry.*

*Keywords: nanotechnology, nanomaterials, aerospace, spacecraft, research, nanostructure.*

Нанотехнологии – это общий термин объединяющий технологии, методы и процессы, которые включают создание и использование материалов, технических систем и устройств, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нанометров. Наноструктурированное вещество приобретает принципиально новые физические и химические свойства, которые не могут быть достигнуты уже известными технологиями.

На сегодняшний день такой раздел науки, как нанотехнологии активно развивается и всё более широко применяется в построении космических аппаратов (КА), так как новые свойства материалов увеличивают их надёжность, прочность и долговечность, а так же позволяют уменьшить вес и габариты проектированных аппаратов.

Активность Российских ученых в области нанотехнологий, как и в других научных направлениях сильно упала в последнее десятилетие двадцатого века, причиной послужил распад СССР. В то же время ученые в США, Японии и в странах Европейского Союза (ЕС) получили государственную поддержку в области нанотехнологических исследований, и совершили множество важных открытий, которые включают в себя создание объемных фотонных кристаллов с запрещенной оптической зоной, синтез углеродных нанотрубок и нанотрубок BN и т.д. [7]. Вследствие чего, развитие наноиндустрии в РФ началось лишь в период наивысшего интереса к этому направлению в мире и повлекло за собой наше существенное отставание в данной области от других стран. Так же можно назвать ещё несколько проблем препятствующих внедрения нанотехнологий в Россию: недостаточно передовое и современное техническое оборудование научно-технических центров, отсутствие независимой сертификационной службы, для выработки стандартов, метрологии и сертификации, способной объективно оценивать качество нанопродуктов, и, конечно же, недостаток квалифицированных специалистов, ведь до сих пор не разработана целостная образовательная система подготовки нового поколения исследователей, обладающих междисциплинарными фундаментальными знаниями и владеющих новейшим синтетическим и диагностическим оборудованием, используемым в нанотехнологиях.

Несмотря на всё вышеперечисленное, в нанотехнологиях существуют такие области, где открытия российских исследователей и ученых стали первыми в мире, положив этим начало развитию новых научных течений. Среди них можно выделить проектирование одноэлектронных приборов, получение ультрадисперсных наноматериалов, а также работы в области атомно-силовой и сканирующей зондовой микроскопии.

После 2000 г., когда Правительство России разработало и приняло программу «Военная наноэлектроника Вооружённых Сил Российской Федерации на период до 2010 года» заинтересованность отечественных исследователей в области нанотехнологий сильно возросла. Если в 2000 г. количество патентных заявок на изобретения, поданных в Российской Федерации составляла 1 шт., то в 2010 и 2018 годах уже 201 шт., а в 2019 г. 210 шт. [1]. А публикационная активность российских авторов в научных изданиях 2020 года индексируемых в Web of Science составила 1291 статей, а индексируемых в Scopus 481 статей, что позволило России занять 10 и 9 места в международном рейтинге стран по числу публикаций по теме нанотехнологии [1].

Специалисты аэрокосмической отрасли различных стран, безусловно, рассматривают использование нанотехнологий и наноматериалов, как одно из самых важных направлений в реализации перспективных и многообещающих космических проектов, ведь это открывает возможности применять конструкционные и функциональные материалы с уникальными свойствами.

В ближайшие годы ожидается появление новых конструкционных материалов на основе наночастиц и нанотрубок, которые позволят без ущерба для прочности снизить вес КА, а так же создание стойких к воздействию космической радиации молекулярных компьютеров, реализация такого проекта, как «космический лифт», инженерное сооружение для без ракетного запуска грузов в космос, на основе сверхпрочного троса, чья длина измеряется от земной поверхности до геостационарной орбиты, разработка биосенсоров, использующих эффект «молекулярного распознавания», создание беспроводных сенсорных сетей для диагностики состояния среды на поверхности других планет, а также нанороботов [3]. Разрабатываются программы для применения нанотехнологий при освоении Луны, Марса, Венеры и создания крупных спутниковых систем для научных исследований и мониторинга состояния Солнца и космической среды.

Непрерывное совершенствование основных систем КА за счет нанотехнологий и наноматериалов позволит уже в ближайшее десятилетие осуществить такие крупные проекты, как строительство обитаемых баз на Луне и пилотируемый полет на Марс, использовать созвездия малых спутников для мониторинга Земли, околоземной космической среды и Солнца, и улучшить апертуру космических телескопов.

РФ не входит в число мировых лидеров по общему объему капиталовложений в сфере нанотехнологий в отличие от Японии, США и ЕС, хотя объем финансирования в рамках программы "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 годы" составил 27,7 млрд.руб. Целью данной программы являлось создание в Российской Федерации современной инфраструктуры национальной нанотехнологической сети для развития и реализации потенциала отечественной наноиндустрии.

Несмотря на то, что в России уже производится целый перечень востребованных наноподуков: нанопорошки, нанотрубки и наномембраны, производство наносодержащей продукции в том виде, в котором оно сейчас имеется, не может считаться наукоемкой и высокотехнологичной отраслью и, не смотря на поддержку со стороны государства, полноценно наноиндустрия в России так и не сформировалась, поэтому по коммерциализации нанотехнологических разработок Россия сильно отстает от США, Японии и стран ЕС.

### **Библиографические ссылки**

1. Наука. Технологии. Инновации: 2022: краткий статистический сборник / Л. М. Гохберг, К. А. Дитковский, М. Н. Коцемир и др.// Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2022. 98 с.
2. Индикаторы науки: 2022: статистический сборник / Л. М. Гохберг, К. А. Дитковский, М.Н. Коцемир и др.// Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2022. 400 с.
3. Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина Нанотехнологии и наноматериалы в космонавтике.// Труды 10 межвузовской школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» 2009. С. 3-15.

4. Н.А. Ганичев, О.Б. Кошовец Российский рынок нанотехнологий: высокотехнологичная Индустрия или статистический феномен // Проблемы прогнозирования 2018. №1 (166). С. 18-28.
5. Д.И. Буханец Нанотехнологии и наноматериалы в космической технике (по материалам отечественной и зарубежной печати)// Новые исследования в разработке техники и технологий. 2014. № 2 .С. 40-45.
6. А.М. Мухаметшина Сравнительный анализ проблем внедрения нанотехнологий в космическую отрасль в России и за рубежом // Решетневские чтения 2015. №. 19. С. 536-537.
7. Ю.Д. Третьяков Проблема развития нанотехнологии в России и за рубежом// Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, 2007. № 1. С. 4-10.

### References

1. Science. Technology. Innovation: 2022: a concise statistical compendium / L.M.Gokhberg, K.A. Ditkovskij, M.N. Kocemir // Nats. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». M.. NIU VShE, 2022. 98 p.
2. Science indicators: 2022: statistical compendium / L. M. Gokhberg, K. A. Ditkovskiy, M.N. Kotsemir i dr.// Nats. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». M.: NIU VShE, 2022. 400 p.
3. L.S. Novikov, E.N. Voronina Nanotechnology and nanomaterials in space.// Proceedings of the 10th Interuniversity School for Young Professionals "Concentrated Energy Flows in Space Engineering, Electronics, Ecology and Medicine 2009.p.3-15.
4. N.A. Ganichev, O.B. Koshovets The Russian nanotechnology market: a high-tech industry or a statistical phenomenon // Problemy prognozirovaniya 2018. no. (166). p. 18-28.
5. D.I. Bukhanets Nanotechnology and nanomaterials in space technology (based on domestic and foreign press)// New research in engineering and technology development. 2014. no 2 .p. 40-45.
6. A.M. Mukhametshina Comparative analysis of the problems of nanotechnology implementation in the space industry in Russia and abroad // Reshetnevskie chteniya 2015. no. 19. p. 536-537.
7. Y.D. Tretyakov The challenge of nanotechnology development in Russia and abroad // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova, 2007. no 1. p. 4-10.

© Ходыкина А. А., Корчевская О. В., 2022

УДК 539.231; 539.2526

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ МЕДИ И МОЛИБДЕНА

П. О. Шалаев\*, Ф. М. Носков, Л. И. Квеглис\*\*, Т. В. Фадеев, В. П. Жереб, К. М. Эренчин

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660074 г. Красноярск, пр. Свободный 79/10  
E-mail: \*justplus@rambler.ru \*\*kveglis@list.ru

*Исследованы особенности структурообразования в слоистой системе Си-Мо, подвергнутой пластической деформации при сварке взрывом. Выявлены особенности механохимических реакций в зонах контакта разнородных металлов в условиях пластической деформации.*

*Ключевые слова: механохимические реакции, сварка взрывом, слоистые композитные материалы, сканирующая электронная микроскопия.*

## RESEARCH OF PROCESSES OF STRUCTURAL FORMATION IN EXPLOSION WELDING OF COPPER AND MOLYBDENUM

P. O. Shalaev\*, F. M. Noskov, L. I. Kveglis\*\*, T. V. Fadeev, V. P. Zhereb, K. M. Erenchin

Siberian Federal University  
79/10, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation  
E-mail: justplus@rambler.ru \*\*kveglis@list.ru

*The features of structure formation in a layered Cu-Mo system subjected to plastic deformation during explosion welding, are studied. The features of mechanochemical reactions in the contact zones of dissimilar metals under conditions of plastic deformation are revealed.*

*Keywords: mechanochemical reactions, explosion welding, laminated composite materials, scanning electron microscopy.*

**Введение.** Слоистые композитные материалы, сочетающие медь и молибден представляют интерес, так как позволяют объединить электро- и теплопроводность меди с коррозионной стойкостью и жаропрочностью молибдена. Подобный композит можно применять для электроконтактов, электропроводников теплообменников и теплопроводов в том числе и в различных космических аппаратах.

Медь и молибден в обычных равновесных условиях не имеют взаимной растворимости ни в твердом, ни в жидком состоянии, [1] однако сварка взрывом создаёт высокие градиенты давления, температуры и концентраций, что открывает возможности для образования различных неравновесных структур, которые требуют изучения.

Целью данной работы было исследовать структуру и механические свойства, а так же особенности структурообразования в слоистой системе Си-Мо, подвергнутой пластической деформации взрывом и выявить особенности механо-химических реакций в зонах контакта разнородных металлов в условиях градиентных полей напряжений, создаваемых при пластической деформации.

**Образцы и методы исследования.** Образцы композиционного материала (КМ) получены сваркой взрывом многослойного пакета пластин технической меди (марка М1) толщиной 0,3 мм и пластин молибдена (марка МЧ) толщиной 0,5 мм. Пакет из чередующихся 7 медных и 7 молибденовых пластин сваривали взрывом одним зарядом взрывчатого вещества аммонита 6ЖВ по методике, описанной в работе [2]. Оценочное давление, создаваемое при сварке взрывом, составляет не ниже 40 ГПа [3]. Энергии, выделяемой при таком давлении, достаточно для переключения старых и создания новых химических связей [4].

В ходе работы были проведены исследования при помощи оптического (CarlZeiss Axio Observer.D1), сканирующего электронного микроскопа (FEI Quanta 650 FEG) и рентгенофазового анализа (Bruker).

**Экспериментальные результаты.** На рис. 1 показана структура композиционного материала медь-молибден полученного сваркой взрывом. В центре (рис. 1, а) расположен слой меди, сверху и снизу – слои молибдена. Хорошо выражена зона контакта, которая имеет волнистую форму, типичную для этого типа сварки. На рис. 1, в видна граница между медью и молибденом. Отчётливо видно возникновение новой фазы на этой границе.

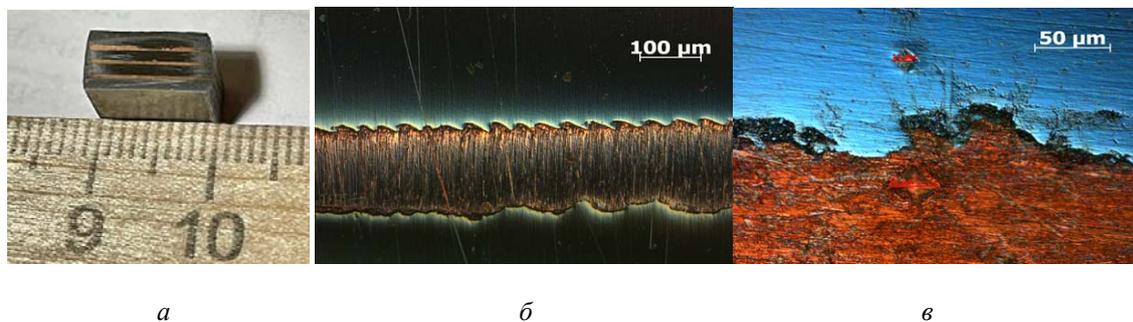


Рис. 1. Структура образца в зоне соединения молибдена и меди после сварки взрывом:  
*а* – общий вид исследуемого образца; *б* – микроструктура, содержащая две различные волны в медном слое между слоями молибдена; *в* – микроструктура зоны контакта меди и молибдена

При помощи сканирующей электронной микроскопии получены изображения границы между двумя металлами, а так же проведено картирование меди и молибдена на участке этой границы. Результаты представлены на рис. 2. Видно, что на границе между медью и молибденом происходит формирование фрактальной поверхности приграничной зоны, при этом образуется мелкодисперсная смесь зёрен молибдена и зёрен меди. Размер этих зёрен меньше порядка 1 мкм, то есть структура имеет наномасштабы, как если бы наблюдалась эвтектика. С учетом того, что медь и молибден при равновесных условиях нерастворимы друг в друге, предполагается возникновение вынужденной эвтектики (дисперсной структуры, формируемой в неравновесных условиях) на наноразмерном уровне.

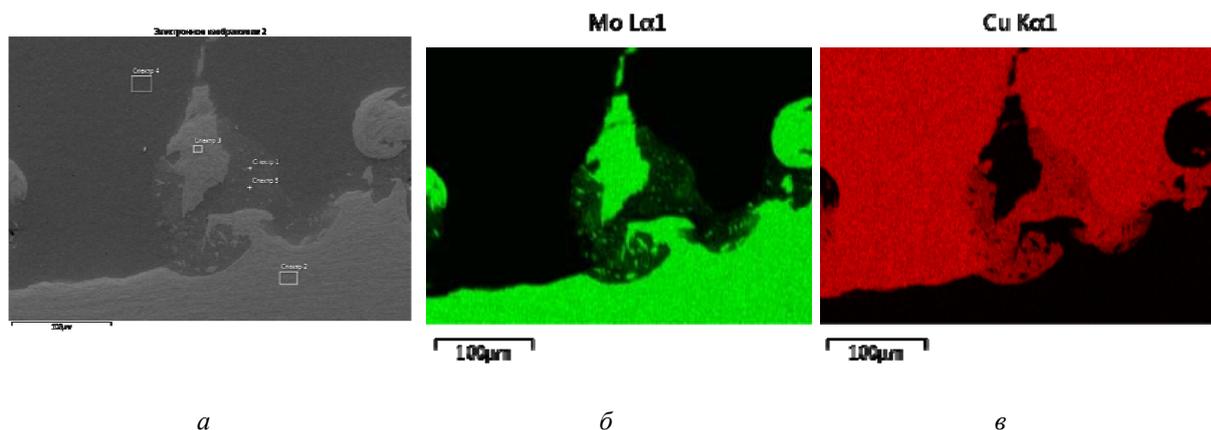


Рис. 2. Электронно-микроскопическое исследование образца КМ медь-молибден:  
*а* – изображение исследуемого участка в электронах; *б* – карта молибдена; *в* – карта меди

Так же из расшифровки спектров рентгеновской дифракции выявлены ещё 5 фаз, не считая меди и молибдена, представляющие собой твёрдые растворы как на основе меди, так и на основе молибдена, причем все интерметаллические фазы расшифровываются как слоистые наноструктуры на основе ОЦК, ГЦК и примитивных кубов.

Таким образом, можно сказать, что сварка взрывом, создавая неравновесные условия, приводит к активному структурообразованию, создавая новые, неравновесные фазы.

### Выводы.

1. Образцы слоистого композиционного материала Cu-Mo, полученные сваркой взрывом исследованы при помощи сканирующего электронного и оптического микроскопов.
2. Обнаружено, что воздействие взрывной волны привело к усложнению поверхности границы медь-молибден и приобретению этой поверхностью фрактальной формы.
3. Установлено, что в результате воздействия взрывной волны образовалась мелкодисперсная наномасштабная структура, подобная эвтектике, которая была названа вынужденной эвтектикой.
4. Выявлено 5 новых фаз, представляющих собой слоистые наноструктуры, не существующих в равновесных условиях.

### Библиографические ссылки

1. Взаимодействие меди и молибдена при взрывных нагрузках / Л. Д. Аникина, Г. И. Бердичевский, В. И. Мали, Т. М. Соболенко // Физика горения и взрыва. 1970. № 1. С. 120–122.
2. Mali V.I., Pavliukova D.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Smirnov A.A., Yrtsev P.S., Bazarkina V.V. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites, *Advanced Materials Research*, 2011, V.311-313, P.236-239.
3. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1972. 188 с. : ил.
4. Falk M. L. Langer J. S. Shear transformation zone theory for elasto-plastic transition in amorphous solids // *Phys. Rev.* 1998. V. E57. P. 7192–7204.

### References

1. *Vzaimodeystvie medi i molibdena pri vzryvnykh nagruzkakh* [Interaction of copper and molybdenum under explosive loads] / L. D. Anikina, G. I. Berdichevskiy, V. I. Mali, T. M. Sobolenko // *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of combustion and explosion]. 1970. № 1. S. 120–122. (In Russ.)
2. Mali V.I., Pavliukova D.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Smirnov A.A., Yrtsev P.S., Bazarkina V.V. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites, *Advanced Materials Research*, 2011, V.311-313, P.236-239.
3. Deribas A. A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding] / AN USSR. Sib. part. In-t gidrodinamiki. Novosibirsk : Nauka Publ. Sib. part, 1972. 188 s. : il. (In Russ.)
4. Falk M. L. Langer J. S. Shear transformation zone theory for elasto-plastic transition in amorphous solids // *Phys. Rev.* 1998. V. E57. P. 7192–7204.

© Шалаев П. О., Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Фадеев Т. В.,  
Жереб В. П., Эренчин К. М., 2022



**Секция**

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
(ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА,  
ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ,  
РЕОЛОГИЯ)»**

УДК 519.63

**РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ НЕРАЗРЫВНОСТИ КОНСЕРВАТИВНЫМ  
ПОЛУЛАГРАНЖЕВЫМ МЕТОДОМ НА ДВУХ СЕТКАХ  
С РАЗНЫМИ ШАГАМИ ПО ВРЕМЕНИ\***

А. В. Вяткин<sup>1\*</sup>, А. Д. Мальцев<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 описан алгоритм из семейства консервативных полулагранжевых методов для решения уравнения неразрывности на двух сетках с разными шагами по времени. Это уравнение входит в систему Навье-Стокса, описывающую течение газа из сопла.*

*Ключевые слова: полулагранжевы методы, уравнение неразрывности, закон сохранения, неравномерная сетка.*

**CONSERVATIVE SEMI-LAGRANGIAN METHOD FOR CONTINUITY EQUATION CONSTRUCTED ON TWO GRIDS WITH DIFFERENT TIME STEPS**

A. V. Vyatkin<sup>1\*</sup>, A. D. Maltsev<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 method for continuity equation constructed on two grids with different time steps. This equation is from the system of Navier-Stokes equations. This system describes gas flow near rocket nozzle.*

*Keywords: semi-Lagrangian method, continuity equation, balance equation, nonuniform grid.*

В настоящее время наиболее точное моделирование вытекания газа из сопла ракеты основано на численном решении системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса [1–3]. Эта система включает в себя уравнение неразрывности. В работе предложен оригинальный подход вычисления решения уравнения неразрывности на вычислительной сетке, состоящей из двух частей, в которых используются разные шаги по времени. Показано выполнение закона сохранения для численного решения в норме  $L_1$  без различного рода поправочных коэффициентов.

Рассмотрим одномерное уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0.$$

Здесь  $\rho(t, x)$  – функция, искомая на множестве  $[0, T] \times \Omega$ , где  $T > 0$ ,  $\Omega = [0, 1]$ . Будем считать, что известна функция скорости  $u(t, x)$ , а для функции  $\rho(t, x)$  заданы начальные и необходимые граничные условия. Множество  $\Omega$  разобьем на две части  $\Omega_1 = [0, 4) \cup (6, 1]$  и  $\Omega_2 = [4, 6]$ . Пусть  $\tau = T / M$ ,  $h = 1 / N$ , где целые числа  $M > 1$ ,  $N > 1$ .

\* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 20-01-00090).

На множестве  $[0, T] \times \Omega_1$  построим сетку

$$\Omega_1^\tau = \{(t_k, x_i): t_k = k\tau, x_i = i h; k = 0, \dots, M\},$$

а на множестве  $[0, T] \times \Omega_2$  построим сетку с шагом во времени, который в два раза больше

$$\Omega_2^\tau = \{(t_m, x_i): t_m = m 2 \tau, x_i = i h; m = 0, \dots, M/2\}.$$

Численное решение  $\rho^h$  уравнения будем искать в виде кусочно-постоянной функции, которая на каждом слое по времени  $t_k$  (или  $t_m$ ) равна некоторой константе в окрестности  $\omega_i = (x_i - h/2, x_i + h/2) \cap \Omega_d$ ,  $d = 1, 2$  узла  $(t_k, x_i)$  (или  $(t_m, x_i)$ ) соответствующей пространственной сетки  $\Omega_d^\tau$ ,  $d = 1, 2$ . Таким образом, поиск численного решения  $\rho^h$  уравнения сводится к поиску решения в узлах сеток  $\Omega_1^\tau$  и  $\Omega_2^\tau$ . Для поиска численного решения используем консервативный полулагранжев метод [4-5]. Новизна и главная особенность созданного подхода состоит в способе вычисления численного решения на общих границах двух сеток  $\Omega_1^\tau$  и  $\Omega_2^\tau$ . Теоретически показано, что разработанный алгоритм имеет первый порядок сходимости численного решения уравнения неразрывности к точному решению. Кроме этого, теоретически доказано выполнение закона сохранения для функции численного решения в норме пространства  $L_1$  при переходе с одного временного слоя на следующий слой без использования каких-либо поправочных коэффициентов. 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 harakteristik dlya chislennoogo 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 539.3

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ФОРМУЛЫ: ГЕОМЕТРИЧЕСКИ-НЕЛИНЕЙНЫЙ ИЗГИБ КОНСОЛИ КОМБИНИРОВАННОЙ НАГРУЗКОЙ

Д. М. Зуев\*, Д. Д. Макаров, К. Г. Охоткин

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

\*E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru

*Работа содержит описание аналитического приближенного решения для геометрически-нелинейного изгиба тонкой упругой консоли комбинированной поперечной нагрузкой: сосредоточенной и равномерно-распределенной гравитационного типа. Решение позволяет получить стрелу прогиба, осевое смещение и формы изогнутого равновесия стержня.*

*Ключевые слова: геометрически-нелинейный изгиб, консоль, приближенное решение, стержень*

## MODIFIED LINEAR THEORY FORMULAS: GEOMETRICALLY NONLINEAR BENDING OF A CANTILEVER WITH COMBINED LOADING

D. M. Zuev\*, D. D. Makarov, K. G. Okhotkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru

*The paper contains an approximate analytic solution for geometrically nonlinear bending of a thin elastic cantilever under combined transversal load: uniformly distributed gravitational load and concentrated load. The solution allows obtaining deflection, axial displacement and bending shapes.*

*Keywords: large deflection, cantilever, geometrically nonlinear bending, approximate solution, rod*

В современной ракетно-космической отрасли часто используются устройства и конструкции, построенные с использованием тонких упругих стержней, которые подвержены большим деформациям. К таким устройствам можно отнести развертываемые зонтичные антенны, «податливые» механизмы и другие конструкции. Поиск приближенных решений, обладающих значительной точностью и простотой использования, имеет высокую актуальность для практических применений.

В работе [1] был предложен метод модификации линейных формул теории сопротивления материалов для изгиба тонкой упругой консоли поперечными нагрузками. Данный метод позволяет достичь точности [2] сравнимой с точными решениями в эллиптических функциях при геометрически-нелинейных изгибах консоли, например такими как [3]. Экспериментальное исследование [4].

В данной работе представлено обобщение данного метода на случай комбинированной нагрузки: сосредоточенной нагрузки на свободном конце  $P$  и равномерно-распределенной нагрузки гравитационного типа интенсивностью  $w$  (вес консоли  $W$ ). Будем рассматривать стержень длиной  $L$ , изгибной жесткостью  $EJ$ . Перейдем в безразмерные координаты  $\xi = x/L$ ,  $\eta = y/L$  и безразмерные параметры сосредоточенной и распределенной нагрузки:  $\mu_P = PL^2/2EJ$  и  $\mu_w = wL^3/2EJ$ . В процессе изгиба стержень приобретает прогиб  $f$ , и осевое смещение  $\delta\xi$ .

В основе метода лежит линеаризованное уравнение Эйлера-Бернулли, которое интегрируется с учетом действующего момента:  $M(\xi) = w(1 - \xi^2)/2 + P(1 - \xi)$  и граничным условием:  $\eta(0)=0$ ,  $\eta'(0)=0$ . Таким образом, мы получаем форму изгиба  $\eta = \eta(\mu_P, \mu_w, \xi)$ . В классической линейной теории [5] считается, что область применимости линейных подходов составляет 3-5% от длины стержня. Данный прогиб соответствует безразмерной нагрузке  $\mu < 0,075$ . В линейной теории считается, что  $\delta\xi = 0$  из-за допущения о малости деформации стержня. При геометрически-нелинейном изгибе такое допущение

не работает, поэтому дополним классическое линейное решение выражениями для контроля осевого смещения  $\delta\xi$ . В таком случае, форма изгиба должна быть построена в пределах от точки заделки в 0 до положения конца стержня  $1 - \delta\xi$ :

$$\eta(\mu_P, \mu_w, \xi) = \frac{\mu_P}{3}(3\xi - \xi^3) + \frac{\mu_w}{12}(\xi^4 - 4\xi^3 + 6\xi^2), 0 \leq \xi \leq 1 - \delta\xi, \quad (1)$$

Стрела прогиба в таком случае определяется, как:

$$f = \eta(\mu_P, \mu_w, \delta\xi) = \frac{\mu_P}{3}(3\delta\xi - \delta\xi^3) + \frac{\mu_w}{12}(\delta\xi^4 - 4\delta\xi^3 + 6\delta\xi^2) \quad (2)$$

Осевое смещение  $\delta\xi$  тогда будет найдено из условия сохранения криволинейной длины консоли (условие равенства криволинейного интеграла по форме изгиба длине стержня):

$$\int_0^{\delta\xi} \sqrt{1 + \left[ \frac{d\eta(\mu_P, \mu_w, \xi)}{d\xi} \right]^2} d\xi = \int_0^{\delta\xi} \sqrt{1 + \left[ \mu_P(1 - \xi^2) + \mu_w \left( \frac{\xi^3}{3} - \xi^2 + \xi \right) \right]^2} d\xi = 1. \quad (3)$$

Построим формы изгиба консоли (1) при различных значениях нагрузки (рис. 1а и 1б), также построим стрелы прогиба (2) и осевое смещение (3) (рис. 1в и 1г).

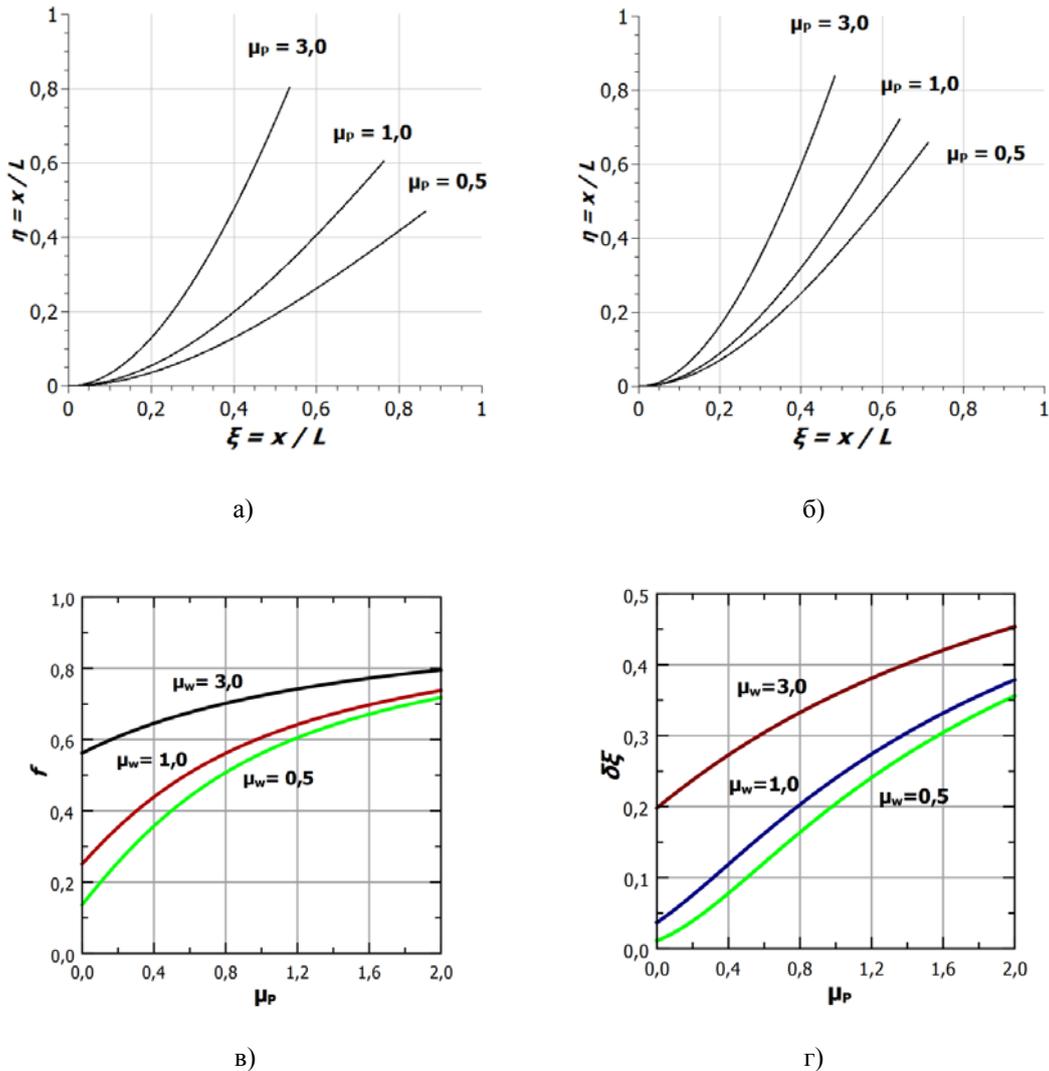


Рис 1. Формы изгиба и стрелы прогиба, полученные методом модификации линейных формул:  
 а) Формы изгиба (1) при нагрузке  $\mu_w = 1,0$  б) Формы изгиба (1) при нагрузке  $\mu_w = 3,0$   
 в) Стрела прогиба  $f$  (2) г) осевое смещение  $\delta\xi$  (3)

Предложено приближенное аналитическое решение для случая геометрически-нелинейного изгиба тонкого упругого стержня комбинированной поперечной нагрузкой, которое позволяет получить формы изгиба, стрелу прогиба и осевое смещение. Решение при этом обладает значительной простотой по сравнению с точными решениями.

#### Библиографические ссылки

1. Зуев Д.М., Охоткин К.Г., Модифицированные выражения для стрелы прогиба консоли в случае поперечной нагрузки // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т.4. №1(31). С. 28-35.
2. Зуев Д.М., Захаров Ю.В. Сравнительный анализ аналитических решений для изгиба консольного стержня поперечной нагрузкой // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2016. Т. 2. С. 306-308
3. Захаров Ю. В., Охоткин К. Г. Нелинейный изгиб тонких упругих стержней // *ПМТФ*. 2002. Т. 43. № 5. С. 124–131.
4. Зуев Д.М., Макаров Д.Д., Охоткин К.Г. Экспериментальное и аналитическое исследование геометрически нелинейного изгиба консоли под действием поперечной нагрузки // *Прикладная механика и техническая физика*. 2022. Т.63. №2. С-217-224.
5. Тимошенко С. П., Gere Дж. Механика материалов: Учебник для вузов. СПб: Издательство «Лань». 2002.

#### References

1. Zuev D.M., Okhotkin K.G. Modified formulas for maximum deflection of a cantilever under transverse loading. *Spacecrafts Technol.*, 2020, Vol. 4, No. 1. P. 28–35 (In Russ.). doi: 10.26732/j.st.2020.1.04
2. Zuev D.M., Zakharov Yu.V. Comparative analysis of analytic solutions for bending of cantilever loaded with a transversal force. *Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2016, Vol. 2, P. 306–308.
3. Zakharov, Y.V., Okhotkin, K.G. Nonlinear Bending of thin Elastic Rods. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2022, Vol. 43, P. 739–744. <https://doi.org/10.1023/A:1019800205519>
4. Zuev D.M., Makarov D.D., Okhotkin K.G. Experimental and Analytical Study of Geometric Nonlinear Bending of a Cantilever Beam under a Transverse Load. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2022, Vol. 63, No. 2, P. 365–371
5. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Mechanics of Materials*. 4th ed. CL Engineering, 1996

© Зуев Д. М., Макаров Д. Д., Охоткин К. Г., 2022

УДК 534.1

## СПОСОБ ЗАДАНИЯ ФУНКЦИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ В МОДЕЛЯХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. П. Кравчуновский

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

*В статье представлены промежуточные результаты исследования по выбору способа задания функции демпфирования, который обеспечивает корректные уровни частотного отклика конструкции на прикладываемое воздействие.*

*Ключевые слова: демпфирование, модель, космический аппарат, диссипация, колебания.*

## APPROACH FOR DEFINING THE DAMPING FUNCTION IN SPACECRAFT MODELS

A. P. Kravchunovsky

JSS Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52 Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

*The article includes intermediate results of analysis intended to choose the method of damping function defining that will allow find frequency response function in the most correct way.*

*Keywords: damping, model, spacecraft, dissipation, oscillation.*

В реальных механических системах, в т.ч. и в конструкциях космических аппаратов (КА) всегда имеют место диссипативные процессы, которые часто имеют природу сил трения. Ввиду этого выведенная из состояния равновесия механическая система будет совершать колебательное движение с некоторым затуханием. Степень затухания при этом будет определяться коэффициентом затухания и для механической колеблющейся системы будет выражаться через демпфирование.

Демпфирование пропорционально скорости и обычно описывается коэффициентом критического демпфирования, хотя существует ряд других коэффициентов, связанных с критическим демпфированием, например, добротность.

Добротность,  $Q$  – это величина, обратная удвоенному отношению коэффициента демпфирования системы к её критическому коэффициенту демпфирования [1]. Так, для КА  $Q = 100$  соответствует низкому демпфированию, в то время, как при  $Q = 10$  демпфирование можно считать высоким [2].

В источнике по исследуемому вопросу [3] существуют рекомендации по выбору значения демпфирования для КА. Однако, эти рекомендации являются обобщенными и, как показывает практика, не всегда позволяют получить корректные результаты при анализе модели КА.

Добротность может быть выражена как функция частоты, и такое представление дает возможность учесть различное демпфирование на разных собственных частотах исследуемой конструкции. Таким образом, возникает потребность в корректном определении функции демпфирования, которая используется для нахождения частотного отклика конструкции на внешнее воздействие.

Исследование зависимости уровня частотного отклика от способа задания функции демпфирования удобно проводить, используя простую модель.

Рассмотрим конечно-элементную модель консольно закрепленной балки, имеющей сечение прямоугольного бруса  $0,08 \times 0,06$  м. С одного конца балка жестко заделана, с другого на нее действует поперечная единичная сила. Модель построена в программном комплексе Femap with Nastran. Модель содержит пять линейных элементов типа BEAM.

В результате модального анализа описанной конструкции была получена так называемая таблица частот, которая впоследствии использовалась для проведения анализа частотного отклика в зависимости от способа задания функции демпфирования. Критерием варьирования выступала связь значения добротности с шириной резонанса.

Рассмотренные случаи (рис. 1):

- 1) постоянное значение  $Q = 10$  на всем диапазоне частот (приведено для сравнения с постоянным  $Q = 100$ );
- 2) узким пиком  $Q = 100$  с шириной 0,2 Гц вокруг резонансной частоты (таблица частот на рис. 2 «а»);
- 3) пиком  $Q = 100$  с шириной равной ширине резонанса (рис. 2 «б»);
- 4) постоянное значение  $Q = 100$  на всем диапазоне частот;
- 5) полкой  $Q = 100$  на  $[62,5 - 76,5]$  Гц,  $Q = 10$  на  $[0 - 62,5]$  и  $[76,5 - 600]$ . Диапазон частот для задания полки выбирался по ширине резонансного пика (рис. 2 «б»).

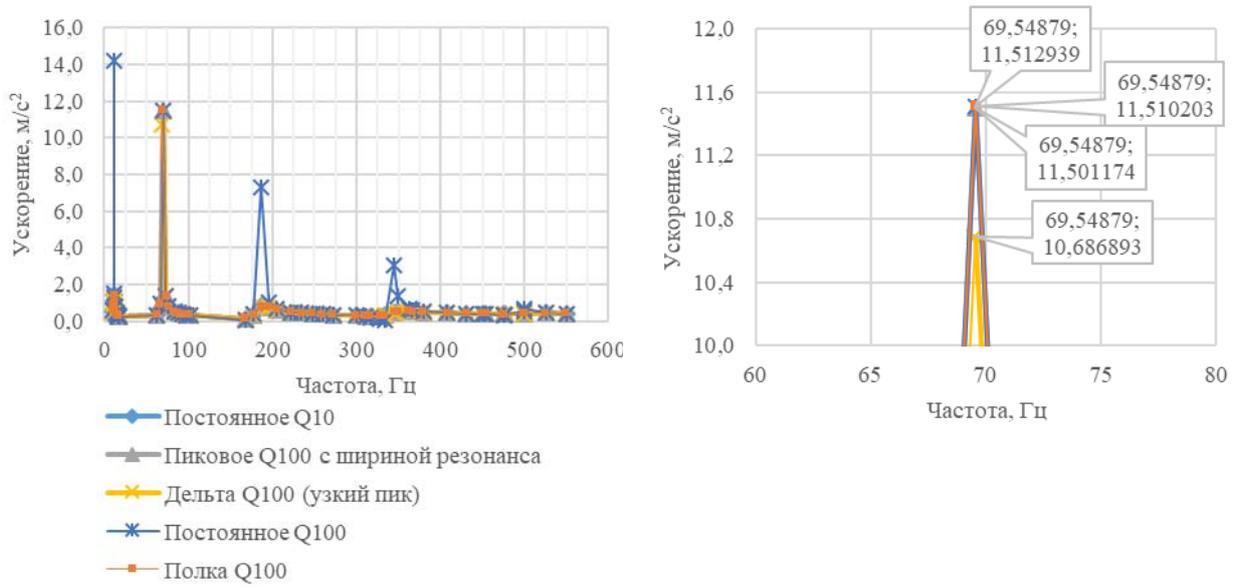


Рис. 1. Частотный отклик в зависимости от способа задания демпфирования

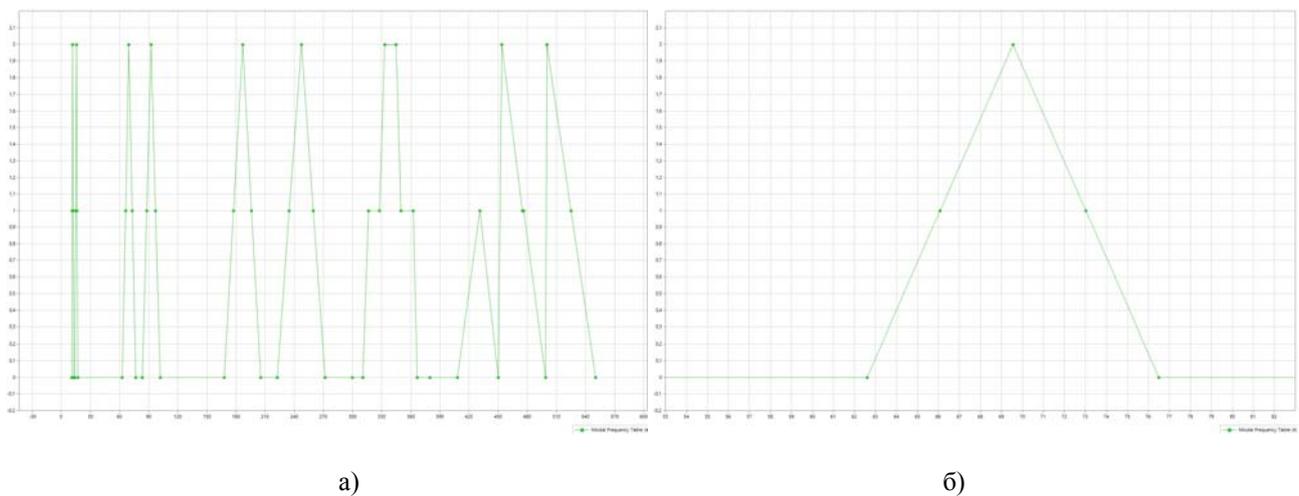


Рис. 2: «а» – Таблица частот, «б» – Резонансный пик

**Анализ результатов:** Во втором случае значение отклика ниже на 7,15 % относительно четвертого случая. В третьем случае – ниже на 0,078 %. В пятом случае – выше на 0,024 %.

**Вывод:** Способ задания демпфирования ступенчатой функцией с шириной ступени, равной ширине резонанса, предпочтительнее остальных, поскольку приближает значение отклика на собственной частоте к соответствующему значению, полученному в случае постоянного  $Q = 100$ .

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 24346–80. Вибрация. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2010. 26 с.
2. ECSS-E-HB-32-26A / Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook. ECSS Secretariat. Noordwijk, The Netherlands, 19 February 2013.
3. Jacob Job Wijker. Spacecraft structures. Springer, 2008. 521 p. doi: 10.1007/978-3-540-75553-1.
4. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.: ил.
5. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. М.: Высш. Школа, 1980. 408 с., ил.

#### References

1. *Vibratsiya. Terminy i opredeleniya* [Vibration. Terms and definitions]. HOST 24346-80 from 1<sup>th</sup> January 1981. (In Russ.)
2. ECSS-E-HB-32-26A / Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook. ECSS Secretariat // ESA-ESTEC Requirements and Standards Division. Noordwijk, The Netherlands, 19 February 2013.
3. Jacob Job Wijker. Spacecraft structures. *Springer*, 2008. 521 p. doi: 10.1007/978-3-540-75553-1.
4. Rychkov S. P. *Modelirovaniye konstruktsiy v srede Femap with NX Nastran* [Structures modeling by Femap with NX Nastran]. Moscow, DMK Press Publ., 2013, 784 p. (In Russ.)
5. Biderman V. L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical oscillations]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980, 408 p. (In Russ.)

© Кравчуновский А. П., 2022

## ОБРАБОТКА МЕДИ ДАВЛЕНИЕМ

А. А. Мамонтов

Сибирский федеральный университет  
660074, г. Красноярск, пр. Киренского, д. 26  
E-mail: mamontov\_x@mail.ru

*Работа посвящена исследованию пластической деформации медной фольги толщиной 30 мкм и шириной около 40 мм при сжатии магнитным полем, созданным током 180 кА, длительность импульса 5 мкс, интеграл действия тока 40000 А2с.*

*Ключевые слова: обработка давлением, металлы, проект.*

## PRESSURE TREATMENT OF COPPER

A. A. Mamontov

Siberian Federal University  
26, Kirensky Av., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation  
E-mail: mamontov\_x@mail.ru

*The work is devoted to the study of plastic deformation of a copper foil with a thickness of 30 microns and a width of about 40 mm when compressed by a magnetic field created by a current of 180 kA, pulse duration of 5 microseconds, the integral of the current action of 40000 A2s.*

*Keywords: pressure treatment, metals, project.*

Магнитное поле оказывает значительное влияние на металлы: может привести металл в движение, вызвать пластическую деформацию, нагреть металл. При взаимодействии сильного импульсного поля с металлическим проводником первые интересные эффекты появляются в диапазоне 0,1-1 МЭ. Вблизи 400 кЭ диффузия магнитного поля приобретает нелинейный характер, и магнитное давление превышает предел текучести большинства металлов [1].

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

где  $W$  = энергия магнитного поля тока,  $L$  = индуктивность,  $I$  = сила тока в проводнике

Образец медной фольги до и после испытания на сжатие при помощи машины LABOX-1575 см. на рис. 1.

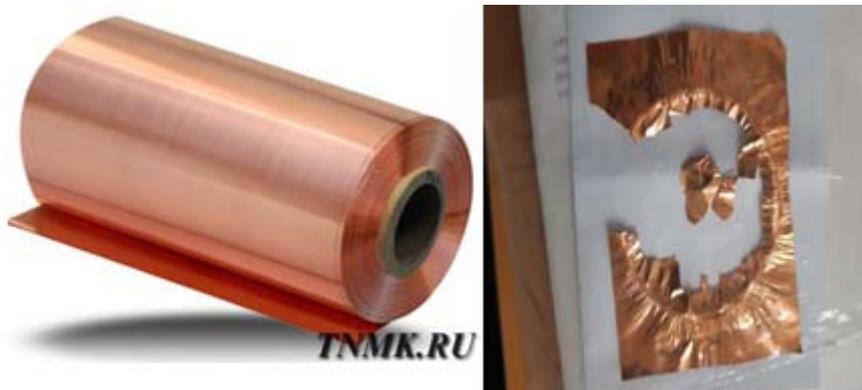


Рис. 1. Образец медной фольги до и после испытания на сжатие

На микроснимке (рис. 2) видны следы прокатки; это подтверждает снимок рентгеновской дифракции.

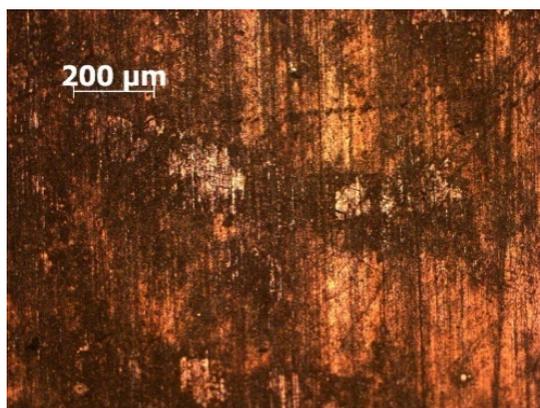


Рис. 2. Микроструктура поверхности исходного состояния медной фольги

Спектр рентгеновской дифракции от стандартного образца медной фольги и таблица расшифровки представлены на рисунке 3 [2].

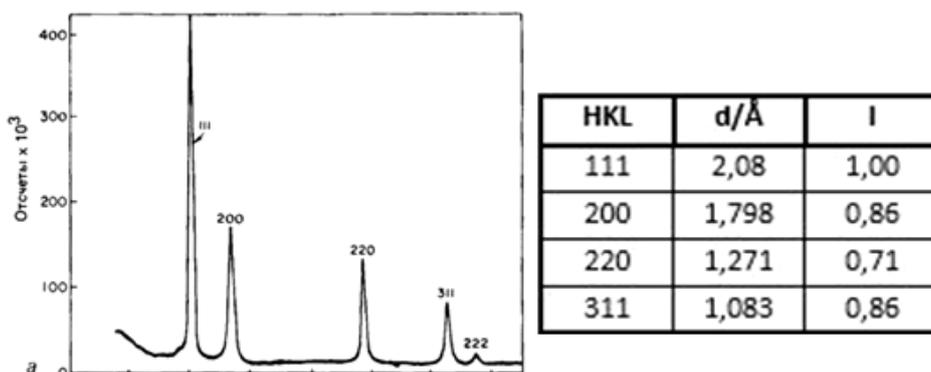


Рис. 3. Спектр рентгеновской дифракции от стандартного образца медной фольги и таблица его расшифровки

Спектр рентгеновской дифракции от сжатого участка образца медной фольги и таблица его расшифровки показан на рисунке 4.

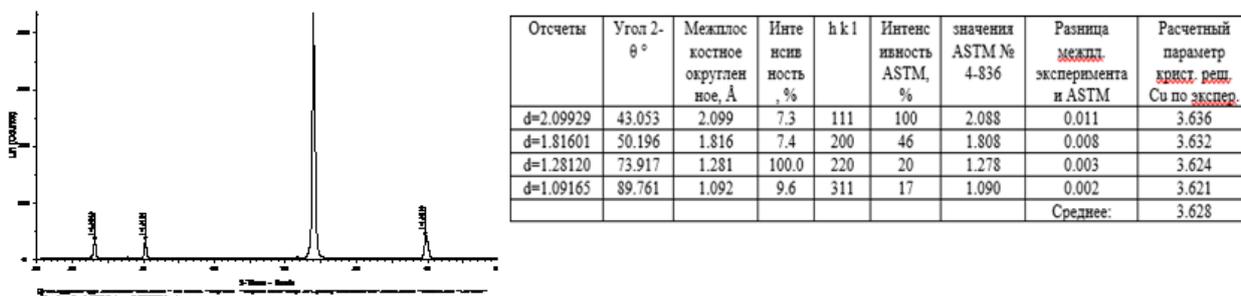


Рис. 4. Спектр рентгеновской дифракции от сжатого участка образца медной фольги и таблица его расшифровки

Согласно данным таблиц, изменения межплоскостных расстояний  $d$  свидетельствуют о пластической деформации, создающей текстуру медной фольги с осью зоны [220]. Текстура связана с разворотом и вытягиванием зерен кристаллической структуры, что подтверждается микрофотографией, приведенной на рисунке 5.

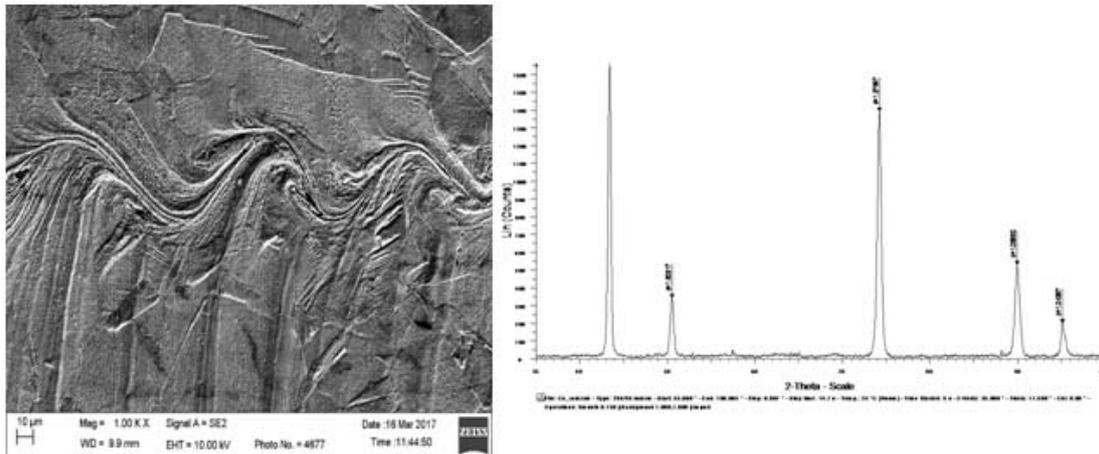


Рис. 5. Микрофотография текстуры на поверхности медной фольги

Таким образом, с помощью дифракции рентгеновских лучей и оптической микроскопии обнаружено, что сжатие медной фольги толщиной 30 мкм магнитным полем, созданным током 180кА приводит к ее пластической деформации и формированию текстуры

Благодарность. Благодарим Михаила Александровича Токмина за оказанную помощь в предоставлении увеличенных при помощи оптического микроскопа изображений образца медной фольги.

#### Библиографические ссылки

1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Москва. Мир. 1972
2. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ/ Москва. Издательство: МИСИС. 1994.

#### References

1. Knopf G. Super-strong pulsed magnetic fields. Moscow. Mir. 1972
2. Gorelik S.S. Radiographic and electron-optical analysis/ Moscow. Publishing house: MISIS. 1994.

© Мамонтов А. А., 2022

УДК 528.88, 550.348.436

## АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ GRACE И GRACE-FO

А. Н. Мацулев<sup>1</sup>, К. В. Симонов<sup>1</sup>, Т. В. Рублева<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 44

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79  
E-mail: \*tvrubleva@mail.ru

*Исследование посвящено анализу особенностей изменения параметра EWH по спутниковым измерениям космических систем GRACE и GRACE-FO в сейсмоактивных районах сильнейших подводных землетрясений. Выполнена интерпретация возмущённого состояния геосреды по цифровым картам пространственного распределения EWH.*

*Ключевые слова: гравитационное поле, геоид, параметр EWH, подводные землетрясения, космическая система GRACE, обработка спутниковых данных.*

## DATA ANALYSIS AND INTERPRETATION GRAVIMETRIC SPACE SYSTEMS GRACE AND GRACE-FO

A. N. Matsulev<sup>1</sup>, K. V. Simonov<sup>1</sup>, T. V. Rubleva<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: \*tvrubleva@mail.ru

*The study is devoted to the analysis of the features of the EWH parameter using satellite measurements of the GRACE and GRACE-FO space systems in seismically active areas of the strongest underwater earthquakes. Interpretation of the disturbed state of the geomedium using digital maps of the spatial distribution EWH is performed.*

*Keywords: gravitational field, geoid, EWH parameter, underwater earthquakes, GRACE space system, satellite data processing.*

В последние десятилетия при изучении временных вариаций гравитационного поля Земли успешно используется измерительная информация, полученная с помощью космических систем (КС) GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, NASA (США) – DLR (Германия)) и GRACE-FO (GRACE-follow on, NASA – DLR) [1]. Технические сведения об этих космических системах содержатся в [2]. Необходимо отметить, что за двадцатилетний период функционирования миссий GRACE (2002-2017 гг.), а затем и GRACE-FO накоплен большой массив экспериментальных данных.

Экспериментальные данные получают с помощью аппаратуры, установленной на двух спутниках-близнецах Grace 1 и Grace 2, двигающихся на расстоянии 220-250 км друг от друга по околополярной орбите. Ее высота составляет 300-500 км, а наклонение 87°- 92°.

В рассматриваемых КС реализован метод межспутникового слежения (Satellite-to-Satellite Tracking, SST) или метод дифференциальных измерений в системах с изменяемой геометрией расположения спутников. Сущность метода SST состоит в измерении расстояний и скорости изменения расстояний между двумя одинаковыми спутниками. Определение расстояний осуществляется дальномером КВВ на частотах К (24,5 ГГц) и Ка (32,7 ГГц). Погрешность измерений системой GRACE не превышает 10 мкм, а GRACE-FO – не более 1 мкм (1 мкм=10<sup>-6</sup> м) [2]. Высокоточное определение ор-

битального положения спутников осуществляется с помощью бортовой навигационной аппаратуры по сигналам GPS. Разность привязки и наземных лазерных наблюдений составляет 2-3 см.

Спутниковые данные GRACE и GRACE-FO представлены на сайте [1] и обновляются с периодичностью 30 суток на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ . Они содержат характеристики пространственного положения спутников-близнецов Grace 1 и Grace 2 относительно Земли, их взаимные расстояния и ускорения. В этой же базе данных находится и обработанная измерительная спутниковая информация в виде пространственных значений параметра EWH (Equivalent Water Height – эквивалентный уровень воды) и коэффициентов сферических гармоник гравитационного геопотенциала.

Отметим, что параметр EWH отражает недифференцированные движения обобщенной массы и характеризует отклонение уровня вод Мирового океана от геоида, где геоид – это эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли, соответствующая среднему уровню вод Мирового океана в состоянии покоя. В [3] показано, что в слое между геоидом и верхней границей водной поверхности за постоянную плотность  $\rho_w$  принято значение, равное  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

В [4] значения параметра EWH рассчитываются с учетом коэффициентов гармоник моделей геопотенциала за вычетом коэффициентов усредненной модели EIGEN-6C. Исходными данными в такой модели являются наземные гравиметрические измерения, лазерные траекторные наблюдения спутников LAGEOS, GOCE, в том числе и измерения космических систем GRACE и GRACE-FO. В [5] указывается, что в модели EIGEN-6C разложение геопотенциала происходит по сферическим гармоникам до порядка 1420, что соответствует пространственному разрешению 14 км.

В основном, в современных исследованиях характеристика EWH используется для анализа динамической топографии океанов и уточнения параметров гравитационного (глобального и локального) поля Земли. В нашей работе выполнен сравнительный статистический анализ данных KC GRACE и GRACE-FO. Для изучения распределения параметра EWH в соответствующий период времени наблюдений использовался гистограммный метод [6].

Полученные гистограммы данных распределения EWH в логарифмических координатах приведены на рис. 1. По оси  $X$  заданы значения EWH (м), по оси  $Y$  – частоты попадания его экспериментальных значений в определенный интервал. Важно подчеркнуть, что введение логарифмической шкалы позволило выявить и исследовать особенности изучаемых распределений в области больших и малых значений. Более подробно исследование полученных гистограмм выполнено и описано в [5].

На рис. 1 красным цветом обозначено распределение параметра EWH, полученное на основе измерительной информации KC GRACE. Синим цветом на рис. 1 показано распределение параметра EWH по данным KC GRACE-FO за период наблюдений с 2018 г. по 2019 г.

Как можно видеть (рис. 1), частные реализации функции распределения величины EWH в различных интервалах являются отображением реальных геофизических процессов во времени наблюдений. Итоговая (за более длительный период измерений) форма распределения величины EWH будет близка к варианту классической функции распределения Коши (Лоренца).

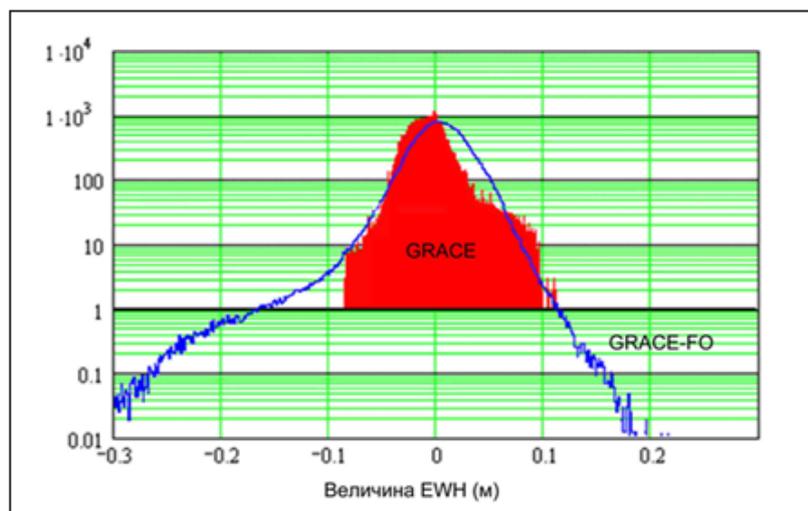


Рис. 1. Изменение параметра EWH по данным GRACE (красный) и GRACE-FO (синий) в соответствующие периоды наблюдений

Таким образом, схожесть гистограмм проанализированных спутниковых данных указывает на преимущество в методологии наблюдений, методике обработки измерений КС GRACE и, запущенной в 2018 г., космической миссии GRACE-FO. Это свидетельствует об однородности спутниковых гравиметрических данных, которые используются авторами для анализа геодинамической активности и гравитационной изменчивости в зонах повышенной сейсмичности.

В ходе выполнения работы создан архив спутниковых данных космических систем GRACE и GRACE-FO. Выполнена интерпретация возмущённого состояния геосреды по цифровым картам пространственного распределения параметра EWH относительно очаговых зон сильных подводных землетрясений, произошедших за последние 20 лет в Тихом океане.

#### Библиографические ссылки

1. GFZ/ISDC. URL:<https://isdc.gfz-potsdam.de/>
2. NASA. GRACE. URL: <https://grace.jpl.nasa.gov/>
3. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1998. Vol. 103. № B 12. P. 30205–30229.
4. Analysis of GRACE satellite measurements over seismically active areas of the strongest earthquakes / Simonov K.V., Kashkin V.B., Rubleva T. V., and et al. // *E3S Web of Conferences: Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2018)*. 2019. Vol. 75. P. 1–5.
5. Evaluation of gravitational anomalies in the areas of strongest earthquakes based on GRACE satellite measurements / Zotin A., Simonov K., Matsulev A., and et al. // *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 159. P. 1642–1651.
6. Anderson T.W. *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis*. Stanford, John Wiley and Sons, 2003, 747 p.

© Мацулев А. Н., Симонов К. В., Рублева Т. В., 2022

УДК 539.3

**К РАСЧЕТУ ЖЕСТКОСТИ ОРТОТРОПНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО  
РАСТЯНУТОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

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

*Одним из способов уменьшения изгибных деформаций пластин является натяжение мембранными силами, приложенными по контуру. Отсюда возникает задача расчета жесткости и прочности предварительно напряженных тонких пластин из ортогонально-анизотропного материала, нагруженных поперечными силами, с неравномерным температурным воздействием. Получены уравнения Б. Сен-Венана и Т. Кармана для анизотропных пластин с учетом приращения температуры на лицевых поверхностях.*

*Ключевые слова: изгиб тонких гибких пластин, продольно-поперечное деформирование.*

**ON THE CALCULATION OF THE RIGIDITY OF AN ORTHOTROPIC  
PRE-STRETCHED PLATE UNDER THE IMPACT OF TEMPERATURE**

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

*One of the ways to reduce the bending deformations of the plates is tension by membrane forces applied along the contour. This raises the problem of calculating the stiffness and strength of prestressed thin plates of orthogonally anisotropic material, loaded with transverse forces, with uneven temperature effects. The equations of B. Saint-Venant and T. Karman for anisotropic plates are obtained taking into account the temperature increment on the front surfaces.*

*Keywords: bending of thin flexible plates, longitudinal-transverse deformation.*

**Введение.** В космической технике применяются тонкие пластины, которые крепятся к жестким ребрам и предварительно растягиваются с помощью сил в ее плоскости [1]. В качестве материала применяются композиты [2], зачастую однонаправленные, физические свойства которых по двум главным направлениям порой отличаются в 15 раз, а прочностные различаются до 40 раз. Распределенные нагрузки, так и локальные силы создают концентрации напряжений. Принцип аддитивности не действует. Неравномерные температурные нагружения изменяют деформативность и напряжения.

По теории изгиба *изотропных* пластин назовем труды [3 – 6].

**Цель работы.** Разработать модель расчета тонких пластин из ортогонально-анизотропного материала для обеспечения жесткости и прочности при приложении поперечных и продольных нагрузок с влиянием температурных изменений.

**Постановка задачи деформирования ортотропной модели изгиба.**

1. В качестве определяющих уравнений воспользуемся законом Гука для тела, обладающего ортогонально-анизотропными свойствами, составленного в декартовой системе координат  $Oxyz$  [2]

$$\begin{Bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 T \\ \alpha_2 T \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $e_{xx}, e_{yy}, e_{xy}$  – компоненты тензора деформаций;  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  – компоненты тензора напряжений;  $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$  – упругие характеристики жесткости (технические константы) ортотропного материала, определенные для главных направлений упругой симметрии  $l-2$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного температурного расширения ортотропного материала по направлениям упругой симметрии  $l-2$ ;  $T = T(x, y, z)$  – приращение температуры.

Уравнения (1) в обратной форме имеют вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{E}_1 & \tilde{E}_{12} & 0 \\ \tilde{E}_{12} & \tilde{E}_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_{xx} - \alpha_x T \\ e_{yy} - \alpha_y T \\ e_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

$$\text{где } \tilde{E}_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad \tilde{E}_2 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad \tilde{E}_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}.$$

2. Применим геометрически нелинейные уравнения Лява – Кармана – Новожилова – Папковича [3 – 6]:

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} z, \\ e_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} z, \\ e_{xy} &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} z. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $u_0 = u(x, y)$ ,  $v_0 = v(x, y)$  – мембранные смещения срединного слоя пластины (при  $z = 0$ );  $w = w(x, y)$  – функция прогиба.

3. Распределение температуры по толщине зададим линейным:  $T(x, y, z) = T_c + T_h z$ . Здесь функции  $T_c = [T(x, y, h/2) + T(x, y, -h/2)]/2$ ,  $T_h = [T(x, y, h/2) - T(x, y, -h/2)]/h$ , зависят от приращений температуры, заданные на лицевых поверхностях пластины.

4. Внутренние силовые факторы, представляющие собой мембранные усилия  $N_x = N_x(x, y)$ ,  $N_y = N_y(x, y)$  и  $S_{xy} = S_{xy}(x, y)$ , изгибающие  $M_x = M_x(x, y)$ ,  $M_y = M_y(x, y)$  и крутящий момент  $H_{xy} = H_{xy}(x, y)$ , получаем интегрированием (2) по толщине пластины.

5. Уравнение неразрывности получим по “методе” из книги [3], в которой рассматривается изотропная пластина. Уравнение равновесия запишем по деформированной схеме. Введение функции Эри  $\varphi = \varphi(x, y)$ , дает уравнения Т. Кармана с учетом ортотропии:

$$\frac{\nu_{21}}{\nu_{12}E_2} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{\nu_{21}}{E_2} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\nu_{12}}{E_1 \nu_{21}} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \alpha_1 \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} - \alpha_2 \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2}. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \left\{ E_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + E_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + [E_1 \nu_{21} + E_2 \nu_{12} + 4G_{12}(1 - \nu_{12}\nu_{21})] \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + E_1(\alpha_1 + \alpha_2 \nu_{21}) \frac{\partial^2 T_h}{\partial x^2} + \right. \\ & \left. + E_2(\alpha_1 \nu_{12} + \alpha_2) \frac{\partial^2 T_h}{\partial y^2} \right\} = -q_z - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения (4), (5) применяются совместно для расчета гибких пластин большого прогиба. Большие прогибы получаются при недостаточных растяжениях продольными силами или при их отсутствии. Величину этих сил и требуется подобрать, чтобы уменьшить прогиб.

Далее, при загрузении пластины существенными продольными силами, то есть для гибких пластин небольшого прогиба, целесообразно применить теорию Сен-Венана. Тогда уравнение (4) будет в правой части с нулевыми функциями от  $w$ :

$$\frac{\nu_{21}}{\nu_{12}E_2} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{\nu_{21}}{E_2} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\nu_{12}}{E_1 \nu_{21}} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} = -\alpha_1 \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} - \alpha_2 \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2}, \quad (6)$$

а в уравнении (5) найденные  $\varphi = \varphi(x, y)$  перенесем в левую часть:

$$\frac{h^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})} \left\{ E_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + E_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + [E_1 \nu_{21} + E_2 \nu_{12} + 4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})] \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right\} +$$

$$+ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = -q_z + \frac{h^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})} \left\{ E_1 (\alpha_1 + \alpha_2 \nu_{21}) \frac{\partial^2 T_h}{\partial x^2} + E_2 (\alpha_1 \nu_{12} + \alpha_2) \frac{\partial^2 T_h}{\partial y^2} \right\}. \quad (7)$$

Приращения температуры проявляются, как производные второго порядка.

### Библиографические ссылки

1. Лопатин А.В., Шумкова Л.В., Гантовник В.Б. Нелинейная деформация ортотропной мембраны, растянутой на жесткой раме солнечного элемента. В: Протокол 49-й конференции AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC, структурной динамики и материалов, 16-й конференции AIAA / ASME / AHS по адаптивным структурам. 10t, Schaumburg, IL: AIAA-2008-2302; 7–10 апреля 2008 г.
2. Композиционные материалы: Справочник/В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; М. Машиностроение, 1990, 512 с.
3. Папкович П.Ф. Строительная механика корабля. Часть II. Сложный изгиб, устойчивость стержней и устойчивость пластин. СУДПРОМГИЗ. Ленинград, 1941. 960 с.
4. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. ОГИЗ.Гостехиздат. Л. - М. 1948. 212 с.
5. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. М. – Л.: ОГИЗ-ГОСТЕХИЗДАТ, 1946, с. 532.
6. Ляв А. Математическая теория упругости. ОНТИ, М. 1935.

### References

1. Lopatin A.V., Shumkova L.V., Gantovnik V.B. Nelinejnaya deformaciya ortotropnoj membrany, rastyanutoj na zhestkoj rame solnechnogo elementa. V: Protokol 49-j konferencii AIAA AHS po adaptivnym strukturam. 10t, Schaumburg, IL: AIAA-2008-2302; 7–10 aprelya 2008 p.
2. Kompozicionnye materialy: Spravochnik/V.V. Vasil'ev, V.D. Protasov, V.V. Bolotin i dr.; M. Mashinostroenie, 1990, 512 p.
3. Papkovich P.F. Stroitel'naya mekhanika korablya. CHast' II. Slozhnyj izgib, ustojchivost' sterzhnej i ustojchivost' plastin. SUDPROMGIZ. Leningrad, 1941. 960 p.
4. Novozhilov V.V. Osnovy nelinejnoy teorii uprugosti. OGIЗ.Gostekhizdat. L.- Moskva. 1948. 212 p.
5. Timoshenko S.P. Ustojchivost' uprugih sistem. Moskva – Leningrad: OGIЗ GOSTEKHIZDAT, 1946, 532 p.
6. Lyav A. Matematicheskaya teoriya uprugosti. ONTI, Moskva. 1935.

© Сабиров Р. А., Фисенко Е. Н., 2022

УДК 539.374

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

С. И. Сенашов\*, И. Л. Савостьянова

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

*Для уравнений, описывающих групповое расслоение уравнений теории упругости, построена бесконечная серия законов сохранения. Показано как эти законы сохранения можно использовать для решения задачи Коши для уравнений динамической теории упругости для двух пространственных переменных.*

*Ключевые слова: уравнения теории упругости, законы сохранения, задача Коши.*

## USING CONSERVATION LAWS TO SOLVE THE CAUCHY PROBLEM OF EQUATIONS OF DYNAMIC ELASTICITY THEORY

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@mail.sibsau.ru

*For the equations describing the group bundle of the equations of elasticity theory, an infinite series of conservation laws is constructed in this article. We have shown that these conservation laws can be used to solve the Cauchy problem for the equations of dynamic elasticity theory for two spatial variables.*

*Keywords: equations of elasticity theory, conservation laws, Cauchy problem.*

Рассмотрим уравнения теории упругости в двумерном случае

$$\bar{w}_{tt} = (\lambda + \mu)\nabla \operatorname{div} \bar{w} + \mu \Delta \bar{w}, \quad (1)$$

где  $\bar{w} = (w_1, w_2)$  - вектор перемещения,  $\lambda, \mu$  - модули упругости.

Для системы (1) задача Коши ставится следующим образом

$$\bar{w}|_{t=0} = \bar{\varphi}(x, y), \quad \bar{w}_t|_{t=0} = \bar{\phi}(x, y). \quad (2)$$

где  $\bar{\varphi}, \bar{\phi}$  - гладкие вектор функции.

Известно, что система (1) гиперболического типа и имеет следующие семейства характеристик

$$\begin{aligned} (\lambda + 2\mu)(\omega_x^2 + \omega_y^2) - \omega_t^2 &= 0, \\ \mu(\omega_x^2 + \omega_y^2) - \omega_t^2 &= 0. \end{aligned}$$

Система (1) с помощью группового расслоения распадается на автоморфную систему уравнений

$$\bar{w}_t = \bar{v}(t, x, y), \quad \operatorname{div} \bar{w} = \theta(t, x, y), \quad \operatorname{rot} \bar{w} = \bar{\omega}(t, x, y) \quad (3)$$

и разрешающую систему уравнений

$$F_1 = \bar{v}_t - (\lambda + \mu)\nabla \theta + \mu \operatorname{rot} \bar{\omega}, \quad F_2 = \theta_t - \operatorname{div} \bar{v}, \quad F_3 = \bar{\omega}_t - \operatorname{rot} \bar{v}. \quad (4)$$

Ищем законы сохранения для системы (4) в следующем виде

$$A_t + B_x + C_y = \tau_1 F_1 + \tau_2 F_2 + \tau_3 F_3. \quad (5)$$

где  $\tau_i$  - некоторые функции, одновременно не равные нулю тождественно.

При этом

$$A = \alpha^1 v_1 + \beta^1 v_2 + \gamma^1 \theta + \delta^1 \omega, \quad B = \alpha^2 v_1 + \beta^2 v_2 + \gamma^2 \theta + \delta^2 \omega, \quad C = \alpha^3 v_1 + \beta^3 v_2 + \gamma^3 \theta + \delta^3 \omega. \quad (6)$$

где  $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, \delta^i$  - искомые функции от  $(t, x, y)$ .

Из (5) следует, что функции  $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, \delta^i$  связаны уравнениями в частных производных первого порядка с постоянными коэффициентами. Из этих уравнений, в частности, следует, что  $(\alpha^1, \beta^1), (\gamma^1, \delta^1)$  - произвольные решения уравнений (1), а остальные коэффициенты из (6) определяются из решения соответствующих уравнений.

В пространстве  $(t, x, y)$  имеем следующий характеристический конус, задаваемый уравнением, где  $t_0$  некоторая точка, лежащая вне поверхности  $S_0$ :

$$(\lambda + 2\mu)(t - t_0)^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (7)$$

Из (3) имеем

$$\iint_{S \cup S_0} A dx dy + B dy dt + C dt dx = \iiint_V (A_t + B_x + C_y) dx dy dt = 0 \quad (8)$$

где  $S, S_0$  - боковая поверхность и основание конуса,  $V$  тело конуса.

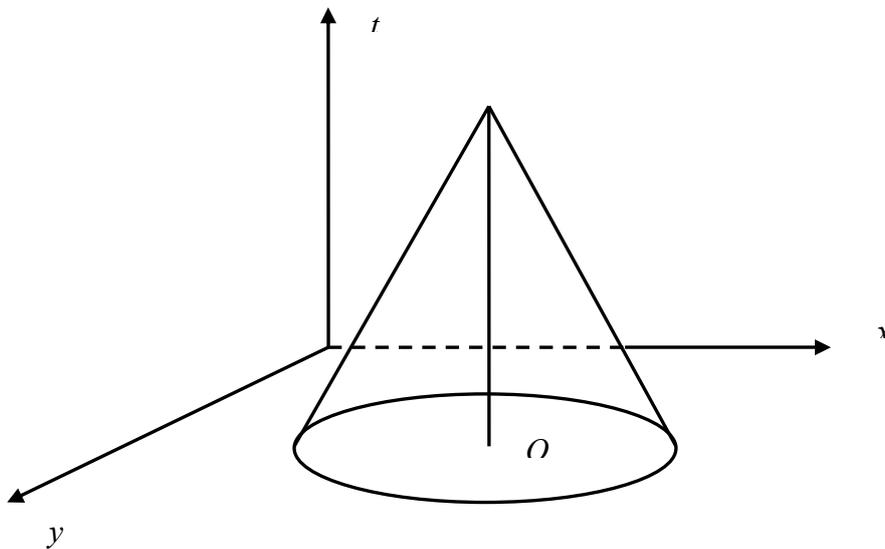


Рис. 1. Характеристический конус

Подбираем функции  $A, B, C$  таким образом, чтобы они обращались в нуль на боковой поверхности конуса, тогда получаем, используя интегрирование по частям.

$$\iint_{S \cup S_0} A dx dy + B dy dt + C dt dx = F(w(t_0, x_0, y_0), \theta(t_0, x_0, y_0), \bar{v}(t_0, x_0, y_0)) \quad (9)$$

Из этих формул можно определить функции  $\theta(t_0, x_0, y_0), \bar{v}(t_0, x_0, y_0), w(t_0, x_0, y_0)$  в произвольной точке  $(t_0, x_0, y_0)$ , а потом из автоморфной системы определить решение системы (1) с граничными условиями (2).

В частности, таким условиям удовлетворяют функции

$$F((\lambda + 2\mu)(t - t_0)^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2).$$

Подобный алгоритм уже реализован для пространственных стационарных уравнений упругости [3 - 5].

#### Библиографические ссылки

1. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Москва, Наука, 1981.
2. Прудников В.Ю., Чиркунов Ю.А. Групповое расслоение уравнений Ламе // Прикладная математика и механика, 1988, т.52, в.3, с. 471 - 477.
3. Сенашов С.И. Законы сохранения и точное решение задачи Коши для уравнений пластичности. // Доклады РАН, 1995, т.345, №5, с.619.
4. Сенашов С.И., Филюшина Е.В. Законы сохранения уравнений плоской теории упругости. // Вестник СибГАУ, 2014, №1(53), с. 79 – 81.
5. Senashov S.I., Gomonova O.V. Construction of elastoplastic boundary in problem of tension of a plate weakened by holes // International Journal of Non-Linear Mechanics V. 108, January 2019, p. 7 – 10.

#### References

1. Smirnov V.I. *Kurs vysshej matematiki* [Course of higher mathematics]. Moscow, Nauka, 1981.
2. Prudnikov V.Yu., Chirkunov Yu.A. [Group bundle of Lamé equations] // *Applied Mathematics and Mechanics*, 1988, vol.52, v.3, pp. 471 - 477.
3. Senashov S.I. [Conservation laws and the exact solution of the Cauchy problem for plasticity equations] *Doklady RAN*. 1995. vol. 345. No. 5. p. 619.
4. Senashov S.I., Filyushina E.V. [Conservation laws of the equations of the plane theory of elasticity] *Vestnik SibGAU*. 2014. №1(53). pp. 79 – 81.
5. Senashov S. I., Gomonova O. V. Construction of elastoplastic boundary in problem of tension of a plate weakened by holes *International Journal of Non-Linear Mechanics* V. 108, January 2019, p. 7 - 10

© Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., 2022

УДК 621.787

## ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ СУПЕРИНВАРА 32НКД

В. И. Трифанов<sup>1</sup>, В. П. Жереб<sup>1,2</sup>, М. П. Бундин<sup>2</sup>, И. В. Трифанов<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  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

\*E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*Исследованы микроструктурные и морфологические изменения образца суперинвара 32НКДД после холодной пластической деформации. Выявлено текстурирование зерен вдоль направления деформации и выделение карбидов.*

*Ключевые слова: суперинвар 32НКД, холодная пластическая деформация, текстурирование микроструктуры.*

## INFLUENCE OF COLD PLASTIC DEFORMATION ON THE MICROSTRUCTURE OF SAMPLES OF SUPERINVAR 32NKD

V. I. Trifanov<sup>1</sup>, V. P. Zhereb<sup>1,2</sup>, M. P. Bundin<sup>2</sup>, I. V. Trifanov<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: sibgau-uks@mail.ru

*The microstructural and morphological changes of the superinvar 32NKDD sample after cold plastic deformation were studied. Texturing of grains along the direction of deformation and precipitation of carbides were revealed.*

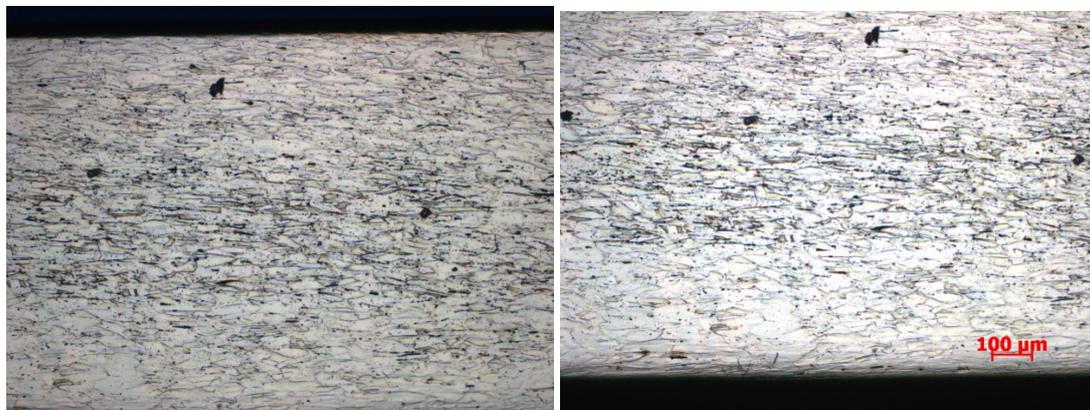
*Keywords: superinvar 32NKD, cold plastic deformation, microstructure texturing.*

**Введение.** Сплав 32НКД является суперинваром и относится к прецизионным сплавам, имеющим низкий термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР), который в интервале температуре  $-60 \div 100$  °С составляет  $0,2 \cdot 10^{-6} \div 0,7 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> [1]. Низкая величина ТКЛР сплава 32НКД обеспечивается благодаря магнитострикционному уменьшению объема в процессе нагрева, которое компенсирует тепловое расширение сплава [2]. При получении изделий из этого сплава широко применяют различные технологии, связанные с формообразованием под давлением. В образцах, подвергнутых холодной пластической деформации, нередко обнаруживается аномальное поведение ТКЛР.

**Цель работы.** Исследование микроструктуры и определение локального состава фазовых составляющих образцов сплава 32НКД после холодной деформации.

**Образцы и методы исследования.** После разрезания, механического шлифования и полирования, две продольные и две торцевые (поперечные) поверхности срезов были обработаны травителем для специальных сталей (состав: CuSO<sub>4</sub> – 4 г; HCl – 20 мл; H<sub>2</sub>O – 20 мл) для выявления границ зерен и их тонкой структуры. Наблюдение микроструктуры микрошлифов проводили на световом микроскопе (СМ) Carl Zeiss Axio Observer A1m. Растровую электронную микроскопию (РЭМ), а также локальный рентгеноспектральный анализ (ЛРСА) выполняли на электронном микроскопе - микроанализаторе Hitachi TM4000 с использованием программного обеспечения Quantax70 (Bruker) [3].

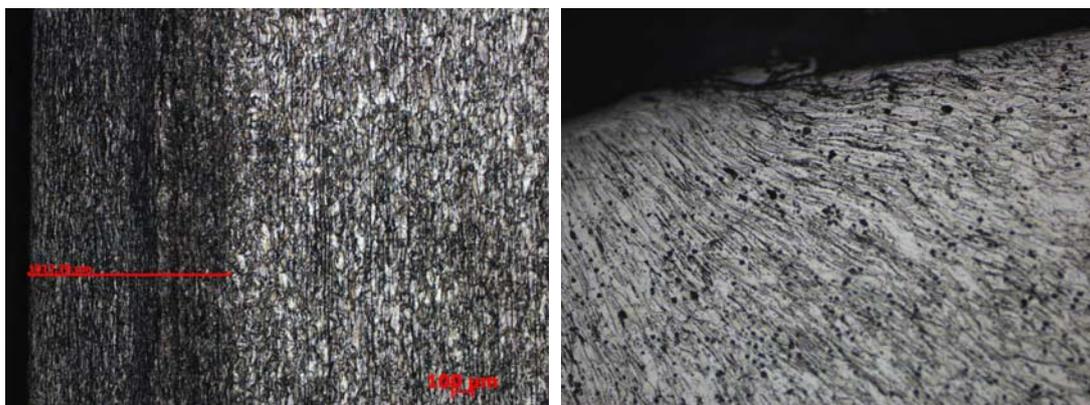
**Результаты.** Холодная пластическая деформация сопровождается формированием микроструктуры с вытянутыми (деформированными) в продольном и поперечном направлениях сильно анизотропными зернами, а также веерным их расположением в углах (рис. 1, 2). Отмечено наличие наиболее структурированного слоя толщиной до 1018 мкм (~ 1 мм), образованного непосредственным воздействием инструмента (рис. 2а). Обнаружены выделения хорошо окристаллизованных частиц карбидов (рис. 3), составы которых близки к  $Fe_4C_7$  и  $Fe_3NiC_7$  (таблица) [4, 5].



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура (СМ) поверхности продольного разреза с внешней (а) и внутренней (б) сторон



а)

б)

Рис. 2. Микроструктура (СМ) продольного среза в области зоны деформационного воздействия (а) и поперечного среза (б -  $\times 100$ )

Таблица

**Интегральный элементный состав включения (область на рис. а)**

Элемент	Атомный номер, серия	Содержание, мас. %	Содержание, ат. %	Содержание, $Fe_3NiC_7$ , ат. %	Содержание, $Fe_4C_7$ , ат. %
Fe	26 K-series	54,52	27,79	27,3	36,4
Ni	28 K-series	18,88	9,16	9,1	
C	6 K-series	26,60	63,05	63,6	63,6
Всего:		100,00	100,00	100,00	100,00

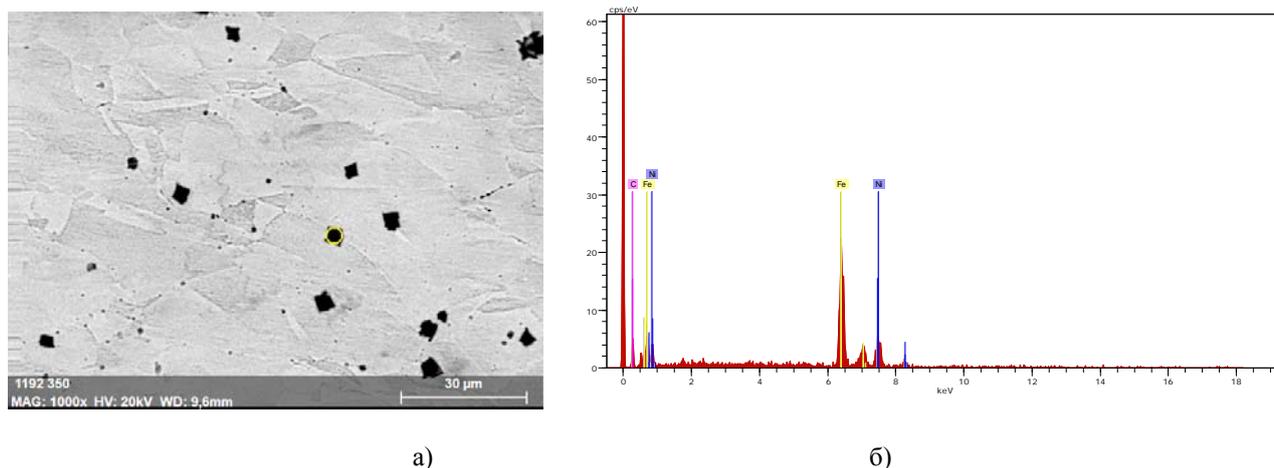


Рис. 3. РЭМ фотография микроструктуры образца (а) и результаты ЛРСА матрицы и выделений карбидов (б) (таблица)

### Библиографические ссылки

- ГОСТ 14082-78. Прутки и листы из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия.
- Wasserman E. F. Invar: moment-volume instabilities in transition metals and alloys // *Ferromagnetic Materials. (Handbook on the Properties of Magnetically Ordered Substances) Vol. 5.* Edited by K.H.J. Buschow and E.P. Wohlfarth. Elsevier Science Publishers B.V., 1990. (590 ps.) P. 237-322.
- QUANTAX 70. EDS table microscope system TM-3000, Hitachi.
- Theoretical aspects of the  $Fe_cNi_{1-c}$  Invar alloy / I. A. Abrikosov, O. Eriksson, P. Söderlind, et al. // *Physical Review B*, 1995. Vol. 51. No 2. P. 1058–1063.
- Phase relations in Fe–Ni–C system at high pressures and temperatures / O. Narygina, L. S. Dubrovinsky, N. Miyajima, et al. // *Physics and Chemistry of Minerals*, 2010. Vol. 38. No 3. P. 203–214.

### References

- GOST 14082-78. Bars and sheets made of precision alloys with a given temperature coefficient of linear expansion. Specifications.
- Wasserman E. F. Invar: moment-volume instabilities in transition metals and alloys // *Ferromagnetic Materials. (Handbook on the Properties of Magnetically Ordered Substances) Vol. 5.* Edited by K.H.J. Buschow and E.P. Wohlfarth. Elsevier Science Publishers B.V., 1990. (590 ps.) P. 237-322.
- QUANTAX 70. EDS table microscope system TM-3000, Hitachi.
- Theoretical aspects of the  $Fe_cNi_{1-c}$  Invar alloy / I. A. Abrikosov, O. Eriksson, P. Söderlind, et al. // *Physical Review B*, 1995. Vol. 51. No 2. P. 1058–1063.
- Phase relations in Fe–Ni–C system at high pressures and temperatures / O. Narygina, L.S. Dubrovinsky, N. Miyajima, et al. // *Physics and Chemistry of Minerals*, 2010. Vol. 38. No 3. P. 203–214.

© Трифанов В. И., Жереб В. П., Бундин М. П., Трифанов И. В., 2022



**Секция**  
**«ХИМИЯ**  
**И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

УДК 547.556.93 + 547.856.1

## КОНДЕНСАЦИЯ 4-ГИДРАЗНИЛХИНАЗОЛИНА С ЭТИЛОВЫМ ЭФИРОМ 2-ГИДРОКСИМИНО-3-ОКСОБУТАНОВОЙ КИСЛОТЫ

Я. И. Агеев\*, Д. К. Нижибовская, А. С. Косицына, 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: yaroslav37x@gmail.com

*Конденсацией 4-гидразинилхиназолина с этиловым эфиром 2-гидроксимино-3-оксобутановой кислоты был впервые получен этил-2-(гидроксимино)-3-[2-(хиназолин-4-ил)гидразинилиден]бутаноат. Строение ранее неизвестного соединения было подтверждено методами ИК спектроскопии и хромато-масс спектрометрии.*

*Ключевые слова: конденсация, гидразон, хиназолин, ИК спектроскопия, хромато-масс спектрометрия.*

## CONDENSATION OF 4-HYDRAZINOQUINAZOLINE WITH ETHYL ETHER OF 2-HYDROXYIMINO-3-OXOBUTANOIC ACID

Y. I. Ageev\*, D. K. Nizhibovskaya, A. S. Kositsyna, P. S. Bobrov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: yaroslav37x@gmail.com

*This article describes condensation of 4-hydrazinyl quinazoline with ethyl ether of 2-hydroxyimino-3-oxobutanoic acid was first obtained ethyl-2-(hydroxyimino)-3-[2-(quinazoline-4-yl)hydrazinylidene]butanoate. IR spectroscopy and chromatography-mass spectrometry confirms the structure of a previously unknown compound.*

*Key words: condensation, hydrazone, quinazoline, IR spectroscopy, chromatography-mass spectrometry.*

Гидразоны обладают различными фармацевтическими свойствами благодаря наличию азометиновой группы (-NH-N=CH-). Так, были обнаружены вещества с противовоспалительными [1], противовирусными [2]. Наиболее часто встречаются гидразоны с антимикробной активностью [3].

Гидразоны являются промежуточным продуктом при циклоконденсации гетарилгидразинов с некоторыми дикарбонильными соединениями, что делает возможным синтез гетероциклов на их основе, имеющих потенциальную биологическую активность [4]. Так гидразоны, полученные из ацетоуксусного эфира, могут стать синтонами для синтеза соответствующих пиразолонов – широкоиспользуемых анальгетиков.

Ранее было показано, что взаимодействие карбонильных и некоторых дикарбонильных соединений с гидразинами, содержащими электроноакцепторную группу, может приводить к получению соответствующих гидразонов и пиразолов [5]. Однако до сих пор не была проведена реакция конденсации 4-гидразинилхиназолина с изонитрозоацетоуксусным эфиром. В ходе этой конденсации можно получить этил-2-(гидроксимино)-3-[2-(хиназолин-4-ил)гидразинилиден]бутаноат, который может обладать полезной биологической активностью или стать синтоном в синтезе перспективного нитропиразолона. Поэтому целью данной работы стало осуществление синтеза этого соединения и подтверждение его строения методами ИК-спектроскопии и хромато-масс спектрометрии.

Для проведения реакции были синтезированы исходные вещества по известным методикам [6-9]. Целевой гидразон получали взаимодействием 4-гидразинилхиназолина с этиловым эфиром 2-гидроксиминоацетоуксусной кислоты в уксусной кислоте при кипячении (см. рисунок). Продукт

был выделен в виде порошка жёлтого цвета. Продолжительное нагревание не привело к замыканию цикла.

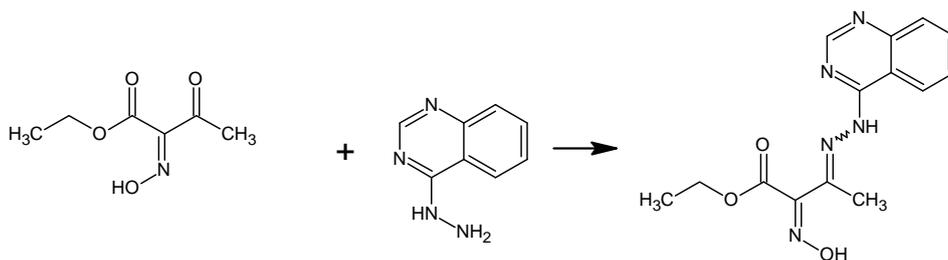


Схема синтеза этил-2-(гидроксимино)-3-[2-(хиназолин-4-ил)гидразинилиден]бутаноата

Строение полученного соединения было подтверждено методами ИК-спектроскопии и хромато-масс спектрометрии.

На ИК спектре гидразона присутствуют характерные полосы поглощения: в области  $3262\text{ см}^{-1}$ , вызванная валентными колебаниями  $\text{-NH-}$  группы;  $1606\text{ см}^{-1}$ , вызванная валентными колебаниями иминогруппы ( $\text{C=N}$ ),  $1774\text{ см}^{-1}$ , вызванная валентными колебаниями карбонильной группы и характерная полоса поглощения в области  $2850\text{ см}^{-1}$ , вызванная валентными колебаниями гидроксильной группы.

На масс-спектре ранее неизвестного соединения наблюдаются фрагментарные ионы с высокой интенсивностью ( $m/z$ ): 283, 207, 184, 170, 129, 102.

Отсутствие молекулярного пика может быть объяснено тем, что распад молекулы начинается с отщепления воды с образованием более стабильного иона, предположительно – триазолилхиназолина.

**Экспериментальная часть.** Суспензию 0,32г (0,002 моля) 4-гидразинилхиназолина и 0,35 г (0,0022 моля) этилового эфира 2-гидроксиминоацетосукусной кислоты в 2 мл уксусной кислоты кипятили в течение 1,5 ч. Продукт выделяли фильтрованием, промывали водой и сушили на воздухе. Выход 0,13 г (22%). Тпл =  $224^{\circ}\text{C}$ , порошок жёлтого цвета.

Масс-спектр,  $m/z$  (Iont (%)): 283 (100)  $[\text{M}-18]^+$ , 238 (24,47), 207 (97,22), 184 (69,29), 170 (58,31), 129 (76,54), 102 (62,71), 75 (19,73).

ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 3262 (NH), 2850 (OH), 1774 (CO), 1606 (CN).

### Библиографические ссылки

1. Kumar V, Basavarajaswamy G, Rai MV, Poojary B, Pai VR, Shruthi N, Bhat M. Rapid ‘one-pot’ synthesis of a novel benzimidazole-5-carboxylate and its hydrazone derivatives as potential anti-inflammatory and antimicrobial agents // *Bioorg Med Chem Lett*. 2015 N 25 p. 1420–1426.
2. Şenkardes S, Kaushik-Basu N, Durmaz İ, Manvar D, Basu A, Atalay R, Küçükgülzel ŞG. Synthesis of novel diflunisal hydrazide-hydrazones as anti-hepatitis C virus agents and hepatocellular carcinoma inhibitors // *Eur J Med Chem*. 2016. N 10. P. 301–308.
3. Popiołek Ł, Biernasiuk A. Design, synthesis, and in vitro antimicrobial activity of hydrazide-hydrazones of 2-substituted acetic acid // *Chem Biol Drug Des*. 2016b. N 88. P. 873–883.
4. Rollas S, Küçükgülzel ŞG. Biological activities of hydrazone derivatives // *Molecules*. 2007. N12. P. 1910–1939.
5. Бобров П.С., Закатова А.К. Изучение взаимодействия хиноксалилгидразина с функционализированными  $\beta$ -дикарбонильными соединениями // материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых им. выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Стромберга (21–24 сент. 2020, г. Томск), Томский политехнический университет, 2020, С. 163-164.
6. Адамс Р., Блейт А., Коп А., Мак-Грю Ф., Ниман К., Снайдер Г. Органические реакции. Ред. Р. Адамс. М.: Издательство иностранной литературы, 1956, 7, 433-434 с.
7. Von Niementowski, St. Synthesis von Chinazolinverbindungen. // *Journal für praktische Chemie*. 1894. T. 51, №1. S. 564-572.

8. Showalter, H.D.H., Denny, W. A. Tyrosine Kinase Inhibitors Analogues of 4-(3-Bromanilo)-6,7-dimethoxy quinazoline (PD 153035), a Potent Inhibitor of the Epidermal Growth Factor Receptor // J. Med. Chem.. 1996. №39. P. 267-276.

9. Higashino, Takeo. On the Reaction of Quinazoline with Nucleophilic Reagents. // Yakugaku Zasshi. 1960. T.80, №2. P. 245–250.

### References

1. Kumar V, Basavarajaswamy G, Rai MV, Poojary B, Pai VR, Shruthi N, Bhat M. Rapid ‘one pot’ synthesis of a novel benzimidazole-5-carboxylate and its hydrazone derivatives as potential anti-inflammatory and antimicrobial agents. *Bioorg Med Chem Lett*. 2015 N 25 p. 1420–1426.

2. Şenkardes S, Kaushik-Basu N, Durmaz İ, Manvar D, Basu A, Atalay R, Küçükgül ŞG. Synthesis of novel diflunisal hydrazide-hydrazone derivatives as anti-hepatitis C virus agents and hepatocellular carcinoma inhibitors. *Eur J Med Chem*. 2016. N 10. P. 301–308.

3. Popiołek Ł, Biernasiuk A. Design, synthesis, and in vitro antimicrobial activity of hydrazide-hydrazone derivatives of 2-substituted acetic acid // *Chem Biol Drug Des*. 2016b. N 88. P. 873–883.

4. Rollas S, Küçükgül ŞG. Biological activities of hydrazone derivatives. *Molecules*. 2007. N12. P. 1910–1939.

5. Bobrov P. S., Zakatova A. K. [Study of the interaction of quinoxalyldiazine with functionalized  $\beta$ -dicarbonyl compounds]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch.-pract. konf. studentov i molodykh uchenykh im. vydayushchikhsya khimikov L.P. Kuleva i N.M. Kizhnera. posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya professora A.G. Stromberga* [Materials of the Intern. Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists named after outstanding chemists L.P. Kulev and N.M. Kizhner, dedicated to the 110th anniversary of the birth of Professor A.G. Stromberg]. Tomsk, 2020, p. 163-164. (In Russ.)

6. Adams R., Bleyt A., Kop A., Mak-Gryu F. *Organicheskiye reaktsii* [Organic reactions]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1956, 7, 433-434 p.

7. Von Niementowski, St. Synthesis von Chinazolinverbindungen.. *Journal für praktische Chemie*., 1894, T. 51, №1, S. 564-572.

8. Showalter, H.D.H., Denny, W. A. Tyrosine Kinase Inhibitors Analogues of 4-(3-Bromanilo)-6,7-dimethoxy quinazoline (PD 153035), a Potent Inhibitor of the Epidermal Growth Factor Receptor. *J. Med. Chem.*, 1996, №39, P. 267-276.

9. Higashino, Takeo. On the Reaction of Quinazoline with Nucleophilic Reagents. *Yakugaku Zasshi*. 1960, T.80, №2, P. 245–250.

© Агеев Я. И., Нижибовская Д. К., Косицына А. С., Бобров П. С., 2022

УДК 547.773 + 547.856.1

## ЦИКЛОКОНДЕНСАЦИЯ 4-ГИДРАЗНИЛХИНАЗОЛИНА С 2-ГИДРОКСИМИНО-1,3-ДИФЕНИЛПРОПАН-1,3-ДИОНОМ

Я. И. Агеев\*, Д. К. Нижибовская, 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: yaroslav37x@gmail.com

*Впервые был получен 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(хиназолин-4-ил)-пиразол реакцией циклоконденсации 4-гидразинилхиназолина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом. Строение ранее неизвестного соединения было подтверждено методом электронной спектроскопии.*

*Ключевые слова: циклоконденсация, хиназолин, нитрозопиразол, изонитрозодибензоилметан, электронная спектроскопия*

## CYCLOCONDENSATION OF 4-HYDRAZINOQUINAZOLINE WITH 2-HYDROXYIMINO-1,3- DIPHENYLPROPANE-1,3-DIONE

Y. I. Ageev\*, D. K. Nizhibovskaya, P. S. Bobrov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: yaroslav37x@gmail.com

*This article describes cyclocondensation of 4-hydrazinoquinazoline with 2-hydroxyimino-1-phenylbutane-1,3-dione. A previously unknown 3,5-diphenyl-4-nitroso-1-(quinazoline-4-yl)-pyrazole was obtained for the first time. The UV/Vis spectrum confirms the structure of a previously unknown compound.*

*Keywords: cyclocondensation, quinazoline, nitrosopyrazole, isonitrosodibenzoylmethane, UV/Vis spectroscopy.*

Пиразольные и хиназолиновые гетероциклы обладают повышенной биологической активностью. Так, известны хиназолинилпроизводные с жаропонижающим, антидерпессантным, обезбаливающим и др. свойствами [1]. В ряду пиразолов также были обнаружены соединения с жаропонижающими, противовоспалительными и другими видами биологической активности [2].

Среди производных пиразола особое значение имеют гетероциклы с азотсодержащими группировками в четвёртом положении цикла, имеющие обширный список полезных свойств [3, 4]. Наличие нитрозогруппы в этом положении позволяет в мягких условиях совершать переход к другим классам органических соединений с потенциальной биологической активностью.

Ранее уже были проведены реакции гетарилгидразинов с изонитрозодикетонами с получением соответствующих N-гетарил-4-нитрозопиразолов [5]. Однако до сих пор не была проведена циклоконденсация 4-гидразинилхиназолина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом. В результате этой циклоконденсации можно получить ранее неизвестный 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(хиназолин-4-ил)-пиразол, который может стать прекурсором в синтезе широкого ряда полезных производных хиназолилпиразольного ряда. Поэтому целью данной работы стало осуществление синтеза 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(хиназол-4-ил)-пиразола и подтверждение его строения методом электронной спектроскопии.

Исходные вещества были получены по известным методикам [6-9]. Циклоконденсация гидразинилхиназолина **2** с изонитрозодибензоилметаном **1** в одну стадию привела к загрязнённому продукту

4, поэтому реакция была проведена в две стадии, с выделением промежуточного соединения **3** (см. рисунок).

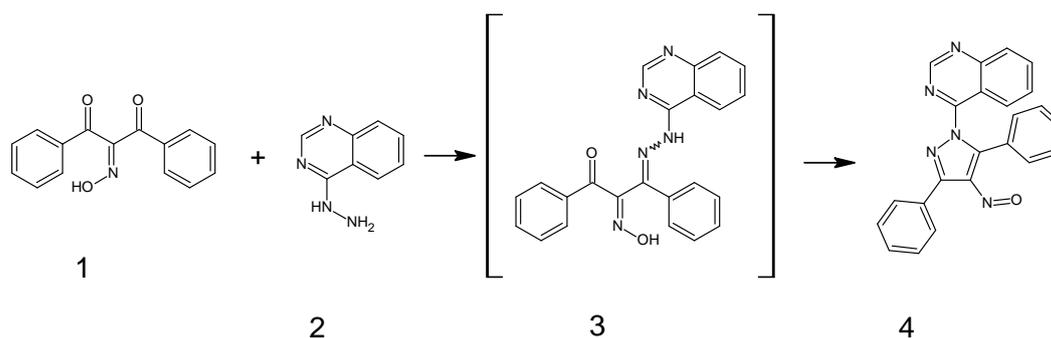


Схема синтеза 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(хиназол-4-ил)-пиразола

На первой стадии в уксусной кислоте при 80<sup>0</sup>С выделяли гидразон, который на следующей стадии замыкали в кипящей уксусной кислоте. После выделения продукт очищали методом колоночной хроматографии, используя в качестве элюента чистый толуол. Впервые полученный 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(хиназолин-4-ил)-пиразол представляет собой кристаллы зелёного цвета. Выход составил 11% от теоретического.

Строение полученного вещества было подтверждено методом электронной спектроскопии. Спектр записывали в хлороформе при концентрации  $1 \times 10^{-2}$  моль/л. Полоса поглощения в области 729 нм обусловлена  $n \rightarrow \pi^*$  переходом нитрозогруппы.

Экспериментальная часть.

Раствор 0,32 г (0,002 моль) 4-гидразинилхиназолина и 0,557 г (0,0022 моль) изонитрозодибензоилметана нагревали при 80<sup>0</sup>С в 2 мл уксусной кислоты в течение 30 мин. Полученный раствор выдерживали при температуре -13<sup>0</sup>С в течение суток. Затем реакционную массу нагревали до комнатной температуры и разбавляли 1,5 мл уксусной кислоты, после чего осадок гидразона отфильтровывали и промывали спиртом. Полученный гидразон суспендировали в 2 мл уксусной кислоты и нагревали при перемешивании 4 ч при 80<sup>0</sup>С, затем 30 мин при кипении, после чего добавляли 5 мл уксусной кислоты и продолжали нагрев ещё 30 мин. Раствор выливали в воду, высаливали и экстрагировали хлороформом (2×15 мл).

Объединённые экстракты промывали рассолом, после чего сушили сульфатом натрия. Продукт очищали методом колоночной хроматографии на силикагеле. Элюент – толуол. Выход: 0,025 г (11%), Тпл = 184-186 (разл.) (CCl<sub>4</sub>), кристаллы зелёного цвета. Электронный спектр (CHCl<sub>3</sub>),  $\lambda_{\max}$ , нм ( $\epsilon$ ): 729 (71).

### Библиографические ссылки

- Panda S., Tripathy U.P. Quinazolone: A Molecule of Significant Pharmacological and Biological Activity. // Research J. Pharm. and Tech., 2013. Т. 6. №8. P. 849-855.
- Daidone, G., Plescia, S., Raffa, D. et al. Synthesis, Crystallographic Studies and Biological Evaluation of Some 2-Substituted 3-Indazolyl-4(3H)-quinazolinones and 3-Indazolyl-4(3H)-benzotriazinones. // Heterocycles. 1996. №43. P. 2385-2396.
- Song Z., In vitro detecting ultra-trace novalgin in medicine and human urine by chemiluminescence. // Talanta. 2003. №60. P. 161-170.
- Grover J., Kumar V., Sobhia M. E., Jachak S. M. Synthesis, biological evaluation and docking analysis of 3-methyl-1-phenylchromeno[4,3-c]pyrazol-4(1H)-ones as potential cyclooxygenase-2 (COX-2) inhibitors. // Bioorg. Med. Chem. Lett. 2014. №24. P. 4638-4642.
- Нижибовская Д. К., Агеев Я. И., Бобров П. С. Циклоконденсация 2-гидразинилхиноксалина с 2-гидроксимино-1,3-дикетонами // Всероссийская конференция «Лесной и химический комплексы проблемы и решения»: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (29 октября 2021 г., Красноярск) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова, СибГУим. М. Ф. Решетнева, 2022. С. 463-466.
- Von Niementowski, St. Synthesis von Chinazolinverbindungen. // Journal für praktische Chemie. 1894. Т. 51, №1. S. 564-572.

16. Showalter, H.D.H., Denny, W. A. Tyrosine Kinase Inhibitors Analogues of 4-(3-Bromanilo)-6,7-dimethoxy quinazoline (PD 153035), a Potent Inhibitor of the Epidermal Growth Factor Receptor // J. Med. Chem., 1996, №39, P. 267-276.

17. Higashino, Takeo. On the Reaction of Quinazoline with Nucleophilic Reagents. // Yakugaku Zasshi. 1960, T.80, №2, P. 245–250.

18. De Neufville R., Pechmann H.V. Ueber das Diphenyltriketon. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 1890, Vol. 23, P. 3378.

### References

1. Panda S., Tripathy U.P. Quinazolone: A Molecule of Significant Pharmacological and Biological Activity. Research J. Pharm. and Tech., 2013, vol. 6, №8, P. 849-855.

2. Daidone, G., Plescia, S., Raffa, D. et al. Synthesis, Crystallographic Studies and Biological Evaluation of Some 2-Substituted 3-Indazolyl-4(3H)-quinazolinones and 3-Indazolyl-4(3H)-benzotriazinones. Heterocycles., 1996, №43, P. 2385-2396.

3. Song Z., In vitro detecting ultra-trace novalgine in medicine and human urine by chemiluminescence. Talanta, 2003, №60, P. 161-170.

4. Grover J., Kumar V., Sobhia M. E., Jachak S. M. Synthesis, biological evaluation and docking analysis of 3-methyl-1-phenylchromeno[4,3-c]pyrazol-4(1H)-ones as potential cyclooxygenase-2 (COX-2) inhibitors. Bioorg. Med. Chem. Lett., 2014, №24, P. 4638-4642.

5. Nizhibovskaya D. K., Ageev Y. I., Bobrov P. S. [Cyclocondensation of 2-hydrazinylquinoxaline with 2-hydroxyimino-1,3-diketones]. *Materialy Vseros. nauch. konf. "Lesnoy i khimicheskiy kompleksy problemy i resheniya"* [Materials All-Russ. Intern. Scientific. Conf "Forest and chemical complexes problems and solutions"]. Krasnoyarsk, 2022, p. 463-466. (In Russ.)

6. Von Niementowski, St. Synthesis von Chinazolinverbindungen. Journal für praktische Chemie., 1894, vol. 51, №1, S. 564-572.

7. Showalter, H.D.H., Denny, W. A. Tyrosine Kinase Inhibitors Analogues of 4-(3-Bromanilo)-6,7-dimethoxy quinazoline (PD 153035), a Potent Inhibitor of the Epidermal Growth Factor Receptor. J. Med. Chem., 1996, №39, P. 267-276.

8. Higashino, Takeo. On the Reaction of Quinazoline with Nucleophilic Reagents. Yakugaku Zasshi., 1960, vol.80, №2, P. 245–250.

9. De Neufville R., Pechmann H.V. Ueber das Diphenyltriketon. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 1890, Vol. 23, P. 3378.

© Ageev Y. I., Nizhibovskaya D. K., Bobrov P. S., 2022

УДК 678.4; 547.458.8

## РОГОЗ ШИРОКОЛИСТНЫЙ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Д. В. Антишин, Д. В. Василишин\*, Т. В. Красикова, Д. Д. Губин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: ameteras008@gmail.com

*В материалах рассмотрено получение целлюлозы из рогоза широколистного азотнокислым методом. Выделенная целлюлоза удовлетворяет требованиям по содержанию  $\alpha$ -целлюлозы и остаточного лигнина для дальнейшего получения нитратов целлюлозы, применяемых в твердом ракетном топливе.*

*Ключевые слова: рогоз широколистный, целлюлоза, делигнификация, азотнокислый метод,  $\alpha$ -целлюлоза, остаточный лигнин.*

## TYPHA LATIFOLIA AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF CELLULOSE

D. V. Antishin, D. V. Vasilishin\*, T. V. Krasikova, D. D. Gubin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ameteras008@gmail.com

*The materials consider the production of cellulose from cattail *Typha Latifolia* by the nitric acid method. The isolated cellulose meets the requirements for the content of  $\alpha$ -cellulose and residual lignin for further production of cellulose nitrates used in solid rocket fuel.*

*Keywords: *typha latifolia*, cellulose, delignification, nitric acid method,  $\alpha$ -cellulose, residual lignin.*

**Введение.** Рогоз широколистный – высшее водное растение, ведущее свой жизненный цикл в полупогруженном состоянии в водоеме или на ее береговой части [1]. Из-за специфики своего ареала обитания затруднено его массовое выращивание, однако получение из него целлюлозы высокого качества является одним из вариантов его переработки после выполнения иных функций: сорбция от загрязняющих веществ почвы, сточных вод, водоемов [2] и их мониторинг; уменьшение испаряемости водоемов, сохраняя его биосферу [3].

В настоящее время в Российской Федерации основным сырьем для производства коллоксилина является хлопковая и древесная целлюлозы [4]. Однако, хлопок, в большей мере, является импортным сырьем, а современные экологические тенденции рекомендуют снизить общее использование древесного сырья. В таких условиях актуальным является направление нахождения альтернативных источников целлюлозного сырья [5].

Качество и выход целлюлозы из растительного сырья сильно зависит от методики ее получения. Для выделения целлюлозы из рогоза широколистного использовался азотнокислый метод [6], оптимизированный для получения целлюлозы, соответствующей требованиям для нитратов целлюлозы.

Анализ целлюлозы на содержание  $\alpha$ -целлюлозы и остаточного лигнина проводился по общепринятым методикам [7].

**Обсуждения результатов.** Для проведения исследования использовался рогоз широколистный сухостойный, собранный в феврале 2022 года на озере вблизи пос. Манино, Красноярский край, Россия. Материал хранился перед использованием пять месяцев.

Перед проведением делигнификации рогоз широколистный предварительно измельчался секатором с шагом 0,5-1 см., далее в гомонизаторе до волокнистой структуры.

Выделенная холоцеллюлоза характеризуется содержанием  $\alpha$ -целлюлозы от 92,04 % до 94,01 % при установленных параметрах делигнификации: последовательная обработка 8 % раствором азотной кислоты в течение 40-60 минут и 10 % раствором щелочи в течение 30 минут на кипящей водяной бане. Иные параметры проведения делигнификации азотнокислым методом признаны недостаточными для

получения целлюлозы необходимого состава или сильно снижают выход целевого продукта. Содержание остаточного лигнина при заданных параметрах находится в диапазоне от 0,5 % до 0,83 %.

Полученные результаты удовлетворяют требованиям к целлюлозе для производства нитрата целлюлозы, используемого в оборонной промышленности: содержание  $\alpha$ -целлюлозы не ниже 92 %, содержание остаточного лигнина не превышает 1,2 % [8].

Увеличение содержания  $\alpha$ -целлюлозы в холоцеллюлозе с 92,04 % до 94,01 % достигается увеличением времени выдержки исходного материала в растворе азотной кислоты, однако значительно уменьшается выход целевого продукта: 32,25 % выход холоцеллюлозы при 40 минутах выдержки в растворе азотной кислоты и 29,03 % при 60 минутах выдержки, соответственно. Уменьшение выхода целевого продукта составляет 11 %, что связано с более глубоко проходящим кислотным гидролизом.

Рогоз широколистный является относительно емким источником целлюлозы среди растительного сырья, а выделяемая целлюлоза может быть использована для производства коллоксилина.

### Библиографические ссылки

1. Капитанова, О. А. Рогозы Вятско-Камского края: Монография / О. А. Капитанова, Г. Р. Платунова, В. И. Капитанов Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 190 с.
2. Amri, A. E. Elaboration, characterization and performance evaluation of a new environmentally friendly adsorbent material based on the reed filter (*Typha Latifolia*): Kinetic and thermodynamic studies and application in the adsorption of Cd (II) ion / A. E. Amri, J. Bensalah, Y. Essaadaoui [et al.] // *Chemical Data Collections*. 2022. Vol. 39. P. 100849. DOI 10.1016/j.cdc.2022.100849.
3. Вайтнер, Е. В. К вопросу о повышении испарения воды с поверхности технических водоемов / Е. В. Вайтнер, А. Н. Попов // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2007. № 2. С. 27-34.
4. Гиндич, В. И. Технология пироксилиновых порохов: в 2т. Т. 1. Производство нитратов целлюлоз и регенерация кислот. Под общ. ред. А. Г. Корсакова. Казань.: Тат. газ.-журн. изд-во, 1995. 959 с.
5. Гисматулина, Ю. А. Перспективы нитратов целлюлозы из нетрадиционного сырья для взрывчатых составов / Г. В. Сакович, В. В. Будаева, А. А. Корчагина, Ю. А. Гисматулина // *Химия растительного сырья*. 2019. № 1. С. 259-268. DOI 10.14258/jcprm.2019014336.
6. Гисматулина, Ю. А. Азотнокислый способ получения целлюлозы (Обзор) / Ю. А. Гисматулина, В. В. Будаева // *Ползуновский вестник*. 2016. № 4-1. С. 174-178.
7. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А., Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы, Экология, Москва, 1991, 320 с.
8. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ, НПО «Профессионал», Санкт-Петербург, 2006. 600 с.

### References

1. Kapitonova, O. A. Rogozy Vyatsko-Kamskogo kraja: Monografiya / O. A. Kapitanova, G. R. Platanova, V. I. Kapitanov Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universitet», 2012. 190 s.
2. Amri, A. E. Elaboration, characterization and performance evaluation of a new environmentally friendly adsorbent material based on the reed filter (*Typha Latifolia*): Kinetic and thermodynamic studies and application in the adsorption of Cd (II) ion / A. E. Amri, J. Bensalah, Y. Essaadaoui [et al.] // *Chemical Data Collections*. 2022. Vol. 39. P. 100849. DOI 10.1016/j.cdc.2022.100849.
3. Vajtner, E.V. K voprosu o povyshenii isparenija vody s poverhnosti tehnicheskikh vodoemov / E. V. Vajtner, A.V. Popov // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2007. no. 2. S. 27-34.
4. Gindich, V. I. Tekhnologiya piroksilinyovyh porohov: v 2t. T. 1. Proizvodstvo nitratov cellyuloz i regeneraciya kislot. Pod obshch. red. A. G. Korsakova. Kazan': Tat. gaz.-zhurn. izd-vo, 1995. 959 s.
5. Gismatulina, YU. A. Perspektivy nitratov cellyulozy iz netradicionnogo syr'ya dlya vzryvchatyh sostavov / G. V. Sakovich, V. V. Budaeva, A. A. Korchagina, YU. A. Gismatulina // *Himiya rastitel'nogo syr'ya*. 2019. № 1. S. 259-268. DOI 10.14258/jcprm.2019014336.
6. Gismatulina, Yu. A. Azotnokislyj sposob polucheniya cellyulozy (Obzor) / Yu. A. Gismatulina, V. V. Budaeva // *Polzunovskij vestnik*. 2016. № 4-1. S. 174-178.
7. Obolenskaya A.V., El'nickaya Z.P., Leonovich A.A., Laboratornye raboty po himii drevesiny i cellyulozy, Ekologiya, Moskva, 1991, 320 s.
8. Novyj spravochnik himika i tekhnologa. Syr'e i produkty promyshlennosti organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv, NPO «Professional», Sankt-Peterburg, 2006. 600 s.

УДК 544.77.032.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ ЭМУЛЬГАТОРА

Д. В. Антишин, Д. Д. Губин\*, Т. В. Красикова, Д. В. Василишин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 123qaz456wsx98@mail.ru

*Проведена разработка состава и исследование свойств эмульсионного взрывчатого вещества, состоящего из аммиачной селитры, угля, эмульгатор «Березит».*

*Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, электрическая емкость, плотность, эмульгатор «Березит», аммиачная селитра.*

## STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE PROPERTIES OF THE EMULSION EXPLOSIVE IN THE PROCESS OF STORAGE OF THE EMULSIFIER

D. V. Antishin, D. D. Gubin\*, T. V. Krasikova, D. V. Vasilishin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 123qaz456wsx98@mail.ru

*The composition and properties of an emulsion explosive consisting of ammonium nitrate, coal, and the emulsifier "Berezit" were developed.*

*Keywords: Emulsion explosive, electrical capacity, density, emulsifier "Berezit", ammonium nitrate.*

**Введение.** В настоящее время особенностью современного ассортимента промышленных взрывчатых веществ в горнодобывающей отрасли является использование простых смесей в виде аммиачной селитры с дизельным топливом, относящихся к эмульсионным взрывчатым веществам. Такие взрывчатые вещества отличаются хорошей водоустойчивостью, безопасностью на всех стадиях изготовления и применения, безотказностью и стабильностью детонации[1]. Однако, выбор эмульгатора является одной из главных и сложных задач исследований при разработке эмульсионных взрывчатых веществ[2].

Целью работы является разработка нового состава эмульсионного взрывчатого вещества и изучение его свойств.

**Материалы и методики.** Для исследования были разработаны два состава ЭВВ и изготовлены образцы. Состав образца №1 включает в себя 30%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  и 70% эмульсионной матрицы, а состав образца №2 включает 20%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  и 80% эмульсионной матрицы. Компоненты подобраны в указанном соотношении с целью поддержания кислородного баланса в количестве  $0 \pm 1\%$ . Эмульсионная матрица состоит из аммиачной селитры, угля и эмульгатора «Березит».

Образцы №1 и №2 были изготовлены спустя 3 месяца после вскрытия эмульгатора «Березит». После получения эмульсионного вещества, у образцов определялась плотность и электрическая емкость согласно требованиям[3], а также устойчивость к детонации.

Через 6 месяцев после вскрытия эмульгатора «Березит» были повторно изготовлены образцы тех же составов и обозначены №3 и №4 соответственно и был проведен аналогичный анализ.

**Результаты и обсуждения.** Полученные результаты по определению плотности и электроемкости ЭВВ представлены в таблице.

По полученным результатам наблюдается сильное изменение в электрической емкости между образцами, изготовленными через 3 месяца после вскрытия эмульгатора и образцами, изготовленными через 6 месяцев. У образцов №1 и №2 электроемкость не превышает допустимого значения, установ-

ленного производителем, в 240 пФ [4], а у образцов №3 и №4 заметно значительное увеличение емкости выше допустимого. Стоит отметить, что образцы с превышающим значением емкости устойчиво детонируют от промежуточного детонатора.

#### Плотность и электрическая емкость

Номер образца	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Электрическая емкость, пФ
1	1,088	196
2	1,013	135
3	1,078	440
4	1,009	320

Таким образом, определено, что при хранении эмульгатор постепенно увеличивает свою емкость до значений, превышающих установленные производителем, при этом детонационная способность изготавливаемых ЭВВ не затухает. Подобное явление объясняется частичной кристаллизацией эмульгатора в процессе хранения, что должно увеличивать чувствительность смеси. Для изучения этого процесса требуется подробное исследование изменений, происходящих в эмульгаторе со временем.

#### Библиографические ссылки

1. Соснин В.А. Внедрение эмульсионных промышленных ВВ в России // IV Международная конференция по открытым и подземным горным работам (Москва, май1998) : сб.докладов. М., 1998. С.104-108.
2. Колганов Е.В., Соснин В.А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества : в 2-х кн. Дзержинск :Изд-во ГосНИИ «Кристалл», 2009. 592 с.
3. ГОСТ 32411-2013. Вещества взрывчатые промышленные. Методы определения электрической емкости, плотности и водоустойчивости эмульсии.
4. АЗОТТЕХ [Электронныйресурс]. URL: <https://azotech.ru/products/khimiya-dlya-bvr/komponenty-dlya-izgotovleniya-vv.html> (дата обращения: 1.09.2022).

#### References

1. Sosnin V.A. Vnedrenie e`mul`sionny`x promy`shlenny`x VV v Rossii // IV Mezhdunarodnaya konferenciya po otkry`ty`m i podzemny`m gorny`m rabotam (Moskva, maj1998) : sb.dokladov.-M., 1998. S.104-108.
2. Kolganov E.V., Sosnin V.A. E`mul`sionny`e promy`shlenny`e vzry`vchaty`e veshhestva : v 2-x kn. Dzerzhinsk :Izd-vo GosNII «Kristall», 2009.– 592
3. GOST 32411-2013. Veshhestva vzry`vchaty`e promy`shlenny`e. Metody` opredeleniya e`lektricheskoy emkosti, plotnosti i vodoustojchivosti e`mul`sii.
4. AZOTTEX [E`lektronny`jresurs]. URL: <https://azotech.ru/products/khimiya-dlya-bvr/komponenty-dlya-izgotovleniya-vv.html> (data obrashheniya: 1.09.2022).

© Антишин Д. В., Василишин Д. В., Красикова Т. В., Губин Д. Д., 2022

УДК 547.917

## ЭКСТРАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА РОГОЗА ШИРОКОЛИСТНОГО ТУРНА LATIFOLIA

Д. В. Антишин, Т. В. Красикова\*, Д. В. Василишин, Д. Д. Губин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: tanya.krasikova.99@mail.ru

*Проведено исследование содержания в рогозе широколистном водорастворимых и органических веществ последовательной экстракцией образцов. Изучение состава рогоза широколистного позволяет лучше изучить его применение в качестве исходного сырья для твердых ракетных топлив.*

*Ключевые слова: рогоз широколистный, экстракция водой, экстракция диэтиловым эфиром, экстрактивные вещества, пектиновые вещества.*

## EXTRACTIVE SUBSTANCES OF TYPHA LATIFOLIA

D. V. Antishin, T. V. Krasikova, D. V. Vasilishin, D. D. Gubin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tanya.krasikova.99@mail.ru

*A study of the content of water-soluble and organic substances in typha latifolia by sequential extraction of samples was carried out. The study of the composition of typha latifolia makes it possible to better study its use as a feedstock for solid rocket fuels.*

*Keywords: typha latifolia, water extraction, diethyl ether extraction, extractive substances, pectin substances.*

**Введение.** На территории Российской Федерации основным сырьем для производства коллоксилина является импортная хлопковая целлюлоза и целлюлоза из долго восполняющегося древесного сырья[1] из-за чего актуален поиск альтернативных источников сырья[2]. Рогоз широколистный является потенциальным источником высококачественной целлюлозы, поэтому для лучшей оптимизации процессов переработки и подбора лучших методик необходимо подробное изучение его состава.

Определение содержания экстрактивных веществ в рогозе широколистом, по аналогии с другим растительным сырьем, позволяет узнать потенциальную безвозвратную потерю массы при переработке в целлюлозу, количество растворимых примесей при выделении биотоплива[3] и долю моносахаридов и пектиновых веществ, влияющих на питательные свойства рогоза широколистного, что актуально при его использовании в качестве кормовых добавок скота.

**Материалы и методики.** Для проведения исследования использовался рогоз широколистный сухостойный, собранный в феврале 2022 года на озере вблизи пос. Монино, Красноярский край, Россия. Материал хранился перед использованием пять месяцев.

С целью подробного изучения количества экстрактивных веществ, вегетативная часть рогоза широколистного была разделена на отделы: верхняя листовая часть, нижняя листовая часть, верхняя стеблевая часть, нижняя стеблевая часть. Полученные отделы измельчались до волокнистой структуры и формировались в образцы для экстракции.

Экстракция горячей водой, определение содержания пектиновых веществ и экстракция диэтиловым эфиром проводились по общепринятым методикам[4].

**Результаты и обсуждения.** Полученные результаты по определению экстрактивных веществ представлены в таблице.

В рогозе широколистном содержание водорастворимых веществ находится в диапазоне от 9,47% до 11,42%, где наибольшее содержание наблюдается в верхней листовой части. В этой же части кон-

центрируется и наибольшее количество пектиновых веществ 1,35% и органических растворимых веществ 0,94%. По отношению к рогозу в целом доля пектиновых веществ составляет от 0,73% до 1,35%, а растворимых органических веществ от 0,54% до 0,94%.

Наименьшее содержание экстрактивных веществ наблюдается у верхней стеблевой части: водорастворимых 9,47% и растворимых органических веществ 0,54%. Однако, наименьшее количество пектиновых веществ содержится в нижней листовой части 0,73% при содержании водорастворимых веществ 11,3%. Пектиновые вещества выделяются в составе водорастворимых экстрактивных веществ, а это значит, что концентрация пектиновых веществ в верхней стеблевой части значительно выше, чем у нижней листовой части, что увеличивает питательную ценность стеблевой части. К последнему стоит добавить, что значительную долю общей массы рогоза широколистного занимает именно стеблевая часть из-за своей высокой плотности упаковки волокон.

#### Содержание экстрактивных веществ в отделах рогоза вегетативной части рогоза широколистного

Образец	Массовая доля водорастворимых веществ, %	Массовая доля пектиновых веществ, %	Массовая доля органических растворимых веществ, %
Нижняя стеблевая часть	11,27	1,2	0,74
Верхняя стеблевая часть	9,47	0,85	0,54
Нижняя листовая часть	11,3	0,73	0,55
Верхняя листовая часть	11,42	1,35	0,94

#### Библиографические ссылки

1. Гиндич, В. И. Технология пироксилиновых порохов: в 2т. Т. 1. Производство нитратов целлюлоз и регенерация кислот. Под общ. ред. А. Г. Корсакова. Казань.: Тат. газ.-журн. изд-во, 1995. 959 с.
2. Гисматулина, Ю. А. Перспективы нитратов целлюлозы из нетрадиционного сырья для взрывчатых составов / Г. В. Сакович, В. В. Будаева, А. А. Корчагина, Ю. А. Гисматулина // Химия растительного сырья. 2019. № 1. С. 259-268. DOI 10.14258/jcprn.2019014336.
3. Биоэтанол из целлюлозы плодовых оболочек овса / Е. А. Скиба, В. В. Будаева, Е. И. Макарова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 22. С. 202-205.
4. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А., Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы, Экология, Москва, 1991, 320 с.

#### References

1. Gindich, V. I. Tekhnologiya piroksilinyovyh porohov: v 2t. T. 1. Proizvodstvo nitratov cellyuloz i regeneraciya kislot. Pod obshch. red. A. G. Korsakova. Kazan': Tat. gaz.-zhurn. izd-vo, 1995. 959 s.
2. Gismatulina, YU. A. Perspektivy nitratov cellyulozy iz netradicionnogo syr'ya dlya vzryvchatyh sostavov / G. V. Sakovich, V. V. Budaeva, A. A. Korchagina, YU. A. Gismatulina // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2019. № 1. S. 259-268. DOI 10.14258/jcprn.2019014336. EDN ZACFML.
3. Bioe'tanol iz cellyulozy' plodovy'x obolochek ovsa / E. A. Skiba, V. V. Budaeva, E. I. Makarova [i dr.] // Vestnik Kazanskogo texnologicheskogo universiteta. 2013. T. 16. № 22. S. 202-205. EDN ROMQCN
4. Obolenskaya A.V., El'nickaya Z.P., Leonovich A.A., Laboratornye raboty po himii drevesiny i cellyulozy, Ekologiya, Moskva, 1991, 320 s.

© Антишин Д. В., Василишин Д. В., Красикова Т. В., Губин Д. Д., 2022

УДК 547.773

**СИНТЕЗ ЭТИЛ-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

*Впервые осуществлен синтез 2-(3,5-диметил-1,4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)ацетата и доказано его строение методами электронной и ЯМР<sup>1</sup>Н спектроскопии.*

*Ключевые слова: 4-нитропиразол, алкилирование, этиловый эфир монохлоруксусной кислоты, ЯМР<sup>1</sup>Н спектроскопия, электронная спектроскопия.*

**SYNTHESIS OF ETHYL-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 synthesis and the structure of ethyl-2-(3,5-dimethyl-1,4-nitroso-1H-pyrazol-1-yl)acetate is shown and proven in this paper using electron spectroscopy and 1H NMR spectroscopy.*

*Keywords: 4-nitrosopyrazole, alkylation, chloroacetic acid ethyl ester, 1H NMR spectroscopy, electron spectroscopy.*

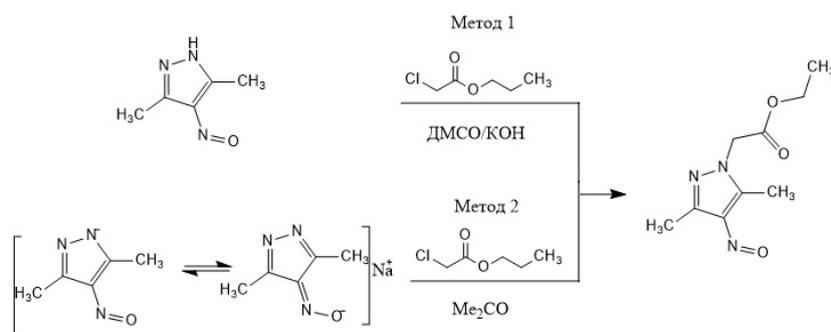
В настоящее время производные 4-нитропиразола вызывают особый интерес в фармацевтической химии [1] и в производстве некоторых пищевых красителей [2] за счет их высокой реакционной способности и биологической активности [3].

Ранее на кафедре ОХТ СибГУ им. М. Ф. Решетнева впервые было проведено N-алкилирование 4-нитропиразолов и выделен ряд ранее неизвестных продуктов [4,5]. В качестве продолжения исследований данной реакции представляло интерес ввести в молекулу нитропиразола сложноэфирную группировку и изучить реакционную способность соответствующих алкилирующих агентов. Таким образом, целью данной работы является проведение реакции 4-нитрозо-1-Н-пиразола с этиловым эфиром монохлоруксусной кислоты и доказательство строения нового N-замещенного продукта.

Синтез осуществляли на основании разработанных ранее методик алкилирования 4-нитрозо-1-Н-пиразолов [4]. Первый метод заключался в проведении реакции в суперосновной среде (ДМСО/КОН) при комнатной температуре, а второй при кипячении алкилирующего агента и натриевой соли пиразола в ацетоне (рис. 1). Выход продукта составил 84 % и 75 % соответственно, в обоих случаях синие кристаллы этил-2-(3,5-диметил-4-нитропиразол-1-ил)ацетата выделяли методом колоночной хроматографии, используя в качестве элюента смесь гексана и этилацетата (50:3).

Данные выходы оказались значительно выше, чем при введении в N-положение 4-нитропиразолов метильного, этильного, пропильного, бутильного и бензильного заместителей (выход до 54 %). Это можно связать с более высокой реакционной способностью данного алкилирующего агента за счет наличия у реакционного центра сложноэфирной группы, а также с более высокой устойчивостью продукта.

**Экспериментальная часть. Метод 1.** Растворяли 0,2 г (1,6 ммоль) 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола в 20 мл ДМСО, вводили 0,116 г (2,07 ммоль) измельченного гидроксида калия. Смесь перемешивали в течение часа при 75-80 °С, охлаждали до комнатной температуры и добавляли 0,35 мл (3,27 ммоль) этилового эфира монохлоруксусной кислоты. Через 5 минут после введения алкилирующего агента синий цвет реакционной массы изменился до зеленого. Смесь перемешивали в течение 5 ч при комнатной температуре, затем вводили 600 мл воды и экстрагировали  $\text{CHCl}_3$  (7 x 15 мл). Экстракт сушили над  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и выделяли продукт методом колоночной хроматографии (силикагель, гексан:этилацетат (50:3)). Выход этил-2-(3,5-диметил-4-нитропиразол-1-ил)ацетата составил 0,28 г (84%).



**Метод 2.** К смеси 0,24 г (1,6 ммоль) натриевой соли 3,5-диметил-4-нитропиразола и 7 мл ацетона при перемешивании вводили 0,35 мл (3,27 ммоль) этилового эфира монохлоруксусной кислоты. Реакционную массу кипятили с обратным холодильником в течение 3,5 ч, при этом цвет смеси менялся от светло-оранжевого до темно-зеленого. Реакционную массу упаривали и выделяли этил-2-(3,5-диметил-4-нитропиразол-1-ил)ацетат с помощью колоночной хроматографии (силикагель, гексан:этилацетат (50:3)) с выходом 0,25 гр (75%).

Этил-2-(3,5-диметил-4-нитропиразол-1-ил)ацетат: синие кристаллы,  $T_{пл} = 67 - 69 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ЯМР  $^1\text{H}$  (600 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta = 4.85$  (с, 2H), 4,27 – 4,3 (м, 2H), 2.87 (уш. с, 3H), 2.32 (уш. с, 3H), 1.32 (т, 3H); УФ-спектр:  $\lambda_{max}$ , нм ( $\epsilon$ ): 303 (17610), 679 (77)

#### Библиографические ссылки

1. Данилов Е.А., Исляйкин М.К. Введение в химию и технологию химико-фармацевтических препаратов, под ред. Г.П. Шапошникова ; Иваново, 2002. 284 с.
2. 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.
3. Orth R. E. Biologically active pyrazoles // J. Pharm Sci., 1968. 57, 537.
4. Боброва А. В., Поздеева А. Н., Кулиева Э. Ш., Рот Е. В. Алкилирование и ацилирование 4-нитрозо-1H-пиразолов // Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XXIII Международной науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, 16–19 мая 2022 г., Томск, 2022. Т. 1. С. 208-209.
5. Боброва А. В., Рибий П. С., Рот Е. В. N-алкилирование 3(5)-метил-5(3)-фенил-4-нитрозо-1H-пиразола // Решетневские чтения : материалы XXV Международной науч.-практ. конф., посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, 10-12 ноября 2021 г., Красноярск, 2022. Т. 1. С. 628-629.

#### References

1. Danilov, E.A., Islyaykin, M.K. Introduction to chemistry and technology of chemical and pharmaceutical preparations, edited by G.P. Shaposhnikov ; Ivanovo, 2002. 284 p.
2. 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.
3. Orth R. E. Biologically active pyrazoles // J. Pharm Sci., 1968. 57, 537.
4. Bobrova A.V., Pozdeyeva A. N., Kulieva E. Sh., Root E. V. Alkylation and acylation of 4-nitroso-1H-pyrazoles // 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, May 16-19, 2022, Tomsk, 2022. Vol. 1. P. 208-209.
5. Bobrova A.V., Ribiy P. S., Root E. V. N-alkylation of 3(5)-methyl-5(3)-phenyl-4-nitroso-1H-pyrazole // Reshetnev Readings : Materials of the XXV International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General Designer of Rocket and Space systems Academician M. F. Reshetnev, November 10-12, 2021, Krasnoyarsk, 2022. Vol. 1. P. 628-629.

© Голенко Э. И., Боброва А. В., Рот Е. В., 2022

УДК 546.083

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМА И МАССЫ НЕФТЕПРОДУКТОВ В АВТОМОБИЛЬНЫХ ЦИСТЕРНАХ

Н. Р. Кашапова\*, 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: nailyak99@gmail.ru

*Рассмотрены вопросы измерения объема и массы нефтепродуктов в автомобильных цистернах. Разработана методика выполнения измерений объема и массы нефтепродуктов в автомобильных цистернах на основе двух методов: прямого динамического и косвенного статического.*

*Ключевые слова: нефтепродукты, автомобильные цистерны, методика выполнения измерений, измерение объема и массы.*

## METHOD FOR MEASURING THE VOLUME AND MASS OF PETROLEUM PRODUCTS IN TANKERS

N. R. Kashapova\*, E. A. Zhirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: nailyak99@gmail.ru

*The issues of measuring the volume and mass of petroleum products in automobile tanks are considered. A methodology for measuring the volume and mass of petroleum products in automobile tanks has been developed based on two methods: direct dynamic and indirect static.*

*Keywords: oil products, road tanks, measurement technique, measurement of volume and mass.*

В настоящее время нефть и продукты ее переработки продолжают оставаться основным мировым энергоносителем. Область их применения очень широка, начиная от автотранспорта и заканчивая использованием в ракетно-космической технике.

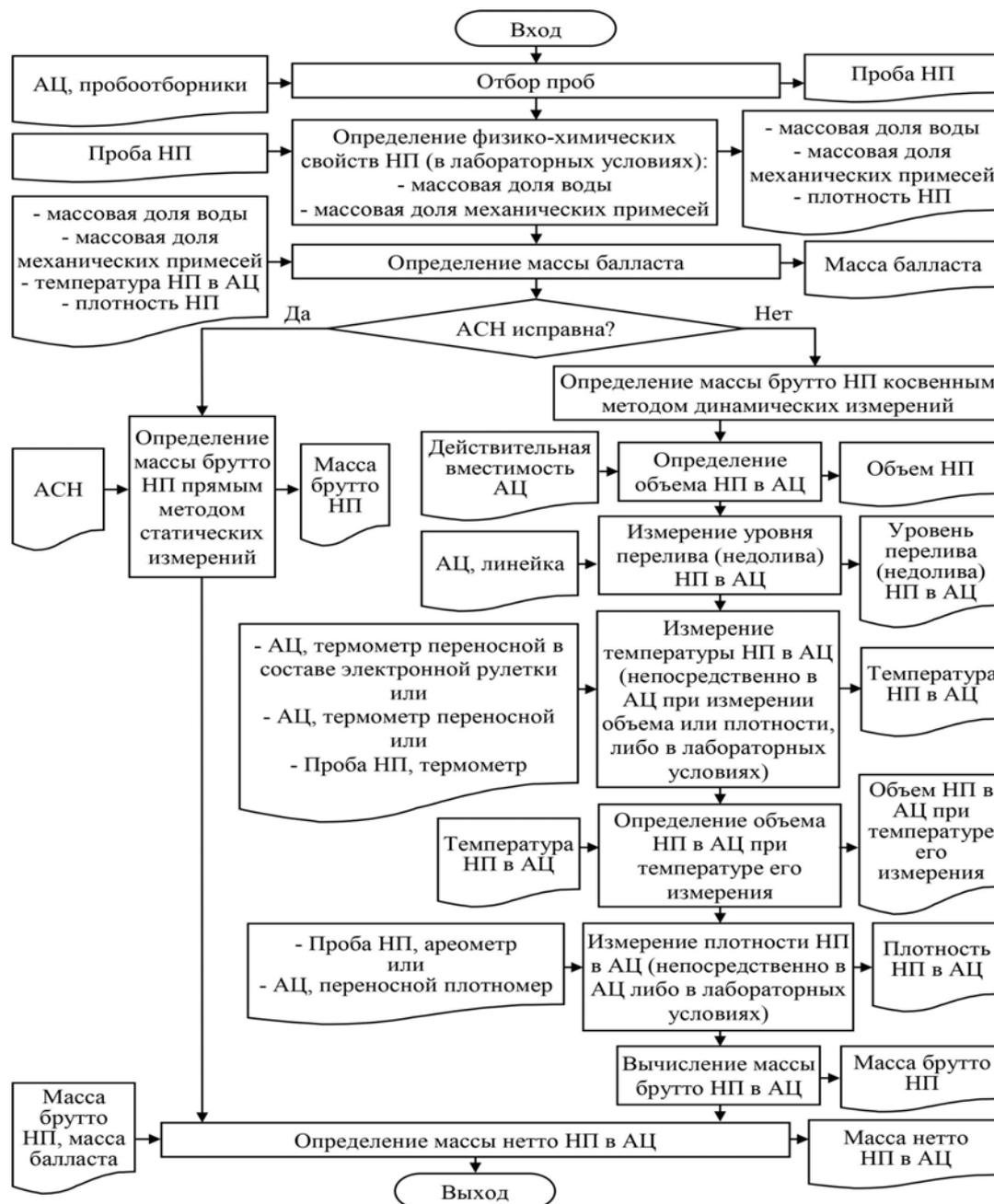
Нефтепродукты (далее – НП) – это большая группа материалов, готовый продукт, полученный при переработке нефти, газоконденсатного, углеводородного и химического сырья [1]. НП получают в результате химического процесса – перегонки нефти, от которой при различных температурах отделяются вещества (отгоны) в парообразном состоянии. К НП относятся такие виды топлива, как бензин, керосин, дизельное топливо, а также масла, технологические консистентные смазки, твердые продукты, такие как битум и парафин.

Для перевозки НП используется большое количество автомобильных цистерн (далее – АЦ), которые одновременно играют роль транспорта и средства измерения (далее – СИ). Поскольку НП считаются грузами повышенной опасности, а их стоимость достаточно высока, к точности измерения массы и объема предъявляются повышенные требования.

В соответствии с п.6.3 Постановления Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847 измерения массы (объема) НП при хранении, передаче на транспортировку, приеме по итогам транспортировки и реализации относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [2], а согласно части 1 статьи 5 Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ измерения, относящиеся к данной сфере, должны выполняться по аттестованным методикам выполнения измерения (далее – МВИ) [3].

Необходимость разработки МВИ обусловлена тем, что точность косвенных измерений зависит не только от метрологических характеристик применяемых СИ, но и от метода, процедуры и условий

измерения, действий оператора. В результате анализа требований к процессу измерения объема и массы НП в АЦ и существующих методов, была разработана МВИ на основе прямого динамического и косвенного статического метода (см. рисунок).



Блок-схема МВИ объема и массы НП в АЦ

В данной МВИ измерения массы брутто НП выполняют методом прямых динамических измерений с применением автоматических систем налива (далее – АСН) по ГОСТ Р 8.587 [4] и, в случае их отказа, методом косвенных статических измерений с использованием параметров качества НП.

Во 2-ом случае массу брутто НП вычисляют как произведение объема и плотности, приведенной к условиям измерения объема. Массу нетто определяют как разность между массой брутто НП и массой балласта. Масса балласта – сумма масс воды и механических примесей в НП, определенных по результатам лабораторного анализа отобранной пробы. При расчетах используют следующие характеристики НП в АЦ:

объем при температуре его измерения, определенный по действительной вместимости АЦ, указанной в свидетельстве о поверке, с учетом перелива или недолива НП;

температуру при измерении объема и плотности, измеренную термометром в точечной пробе НП, отобранной по ГОСТ 2517 [5] из АЦ, или электронным термометром в АЦ;

плотность, приведенную к стандартным условиям по результатам измерений в лаборатории, или на месте отбора проб по ГОСТ 3900 [6] или ГОСТ Р 51069 [7] в точечной пробе НП, отобранной по ГОСТ 2517 [5] из АЦ, или переносным плотномером в АЦ.

Разработанная МВИ стандартизуется и аттестуется аккредитованной на данный вид деятельности организацией. Применение аттестованной МВИ объема и массы НП в АЦ позволяет получить результаты измерений с заданной точностью и достоверностью.

### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 26098-84. Нефтепродукты. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2010. 12 с.
2. Постановление Правительства РФ от 16.11.2020 г. № 1847. Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. М. : Собрание законодательства РФ, № 48, 2020. 66с.
3. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» М.: Собрание законодательства РФ, № 26, 2008. 26 с.
4. ГОСТ 8.587-2019. ГСИ. Масса нефти и нефтепродуктов. Методики (методы) измерений. М.: Стандартинформ, 2019. 51 с.
5. ГОСТ 2517-2012. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб. М. : Стандартинформ, 2010. 39 с.
6. ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. М. : Стандартинформ, 2006. 36 с.
7. ГОСТ Р 51069-97. Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API ареометром. М. : Стандартинформ, 2006. 13 с.

### References

1. GOST 26098-84. Oil products. Terms and Definitions. M. : Standartinform, 2010. 12 p.
2. Decree of the Government of the RF of November 16, 2020 №. 1847. On approval of the list of measurements related to the sphere of state regulation of ensuring the uniformity of measurements. M. : Collection of Legislation of the RF, № 48, 2020. 66 p.
3. Federal Law of June 26, 2008 № 102-FZ “On Ensuring the Uniformity of Measurements” M.: Collection of Legislation of the RF, № 26, 2008. 26 p.
4. GOST 8.587-2019. GSI. Mass of oil and oil products. Techniques (methods) of measurements. Moscow: Standartinform, 2019. 51 p.
5. GOST 2517-2012. Oil and oil products. Sampling methods. M. : Standartinform, 2010. 39 p.
6. GOST 3900-85. Oil and oil products. Methods of calculation. M. : Standartinform, 2006. 36 p.
7. GOST R 51069-97. Oil and oil products. Method of determination, rough estimate and estimate in API degrees by hydrometer. M. : Standartinform, 2006. 13 p.

©Кашапова Н. Р., Жирнова Е. А, 2022

УДК 547.773

**СИНТЕЗ N-БЕНЗИЛ-3,5-ДИФЕНИЛ-4-НИТРОЗОПИРАЗОЛА**

Э. Ш. Кулиева\*, А. Н. Поздеева, 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: elmirakulieva.ru@mail.ru

*В результате взаимодействия 3,5-дифенил-4-нитрозо-1H-пиразола с бензилхлоридом в суперосновной среде получен ранее неизвестный N-бензил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразол. Структура продукта подтверждено ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопией*

*Ключевые слова: N-алкилирование, 4-нитрозопиразол, бензилхлорид.*

**SYNTHESIS OF N-BENZYL-3,5-DIPHENYL-4-NITROSOPYRAZOLE**

E. Sh. Kulieva\*, A. N. Pozdeeva, A. V. Bobrova, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: elmirakulieva.ru@mail.ru

*As a result of the interaction of 3,5-diphenyl-4-nitroso-1H-pyrazole with benzyl chloride in a super-new medium, a previously unknown 1-benzyl-3,5-diphenyl-4-nitrosopyrazole was obtained. The structure of the product is confirmed by NMR <sup>1</sup>H spectroscopy.*

*Keywords: N-alkylation, 4-nitrosopyrazole, benzyl chloride.*

В настоящее время производные нитрозопиразолов широко применяются в качестве лекарственных препаратов, в лакокрасочной и пищевой промышленности. Так же подобные вещества обладают высокой биологической активностью и могут использоваться как модификаторы эластомерных композиций, что позволит расширить теоретические границы и получать перспективные продукты для химической промышленности [1-3].

Ранее на кафедре органической химии и технологии органических веществ СибГУ им. М.Ф. Решетнева была показана возможность N-алкилирования производных 4-нитрозопиразолов [4]. До настоящего момента бензилхлорид в подобные реакции не вводился. Поэтому представляется интерес для развития синтетических и препаративных возможностей реакции N-алкилирования введения бензильного остатка. Таким образом, целью работы является синтез N-бензил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола и идентификация полученного соединения (рис. 1).

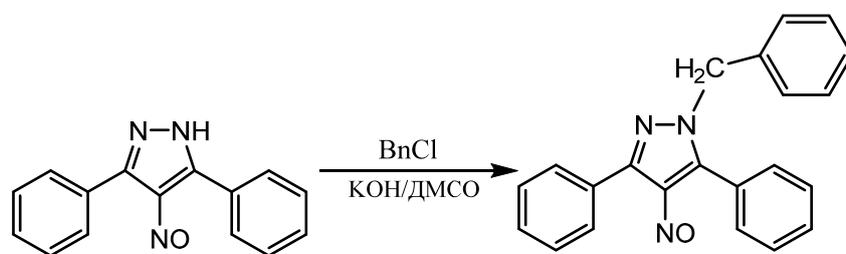


Рис. 1. Синтез N-бензил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола

*Метод синтеза N-бензил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола. 0,4 г (1,6 ммоль) 3,5-дифенил-4-нитрозо-1H-пиразола растворяли в 20 мл ДМСО, добавляли измельченный KOH и термостатировали*

при перемешивании в течение 1 часа до 75-80 °С. После истечение времени реакцию массу охлаждали до 40 °С и добавляли 0,37 мл (0,32 ммоль) бензилхлорида при перемешивании. Процесс проводили при температуре 65-70°С в течение 6,5 часов. Затем реакцию массу разбавляли 550 мл воды и экстрагировали хлороформом (15 мл x 7), затем органическую фазу сушили над сульфатом натрия и упаривали в вакууме. Продукт очищали методом колоночной хроматографии (силикагель; гексан – этилацетат 10:1). Получали осадок голубого цвета с выходом 32%.

Спектр N-бутил-3,5-дифенил-4-нитропиразола записывали в DMSO-d<sub>6</sub> на приборах Bruker Avance III 600. В качестве внутреннего стандарта использовали тетраметилсилан (ТМС). ЯМР <sup>1</sup>H спектр исследуемого вещества представлен на рис. 2 [5].

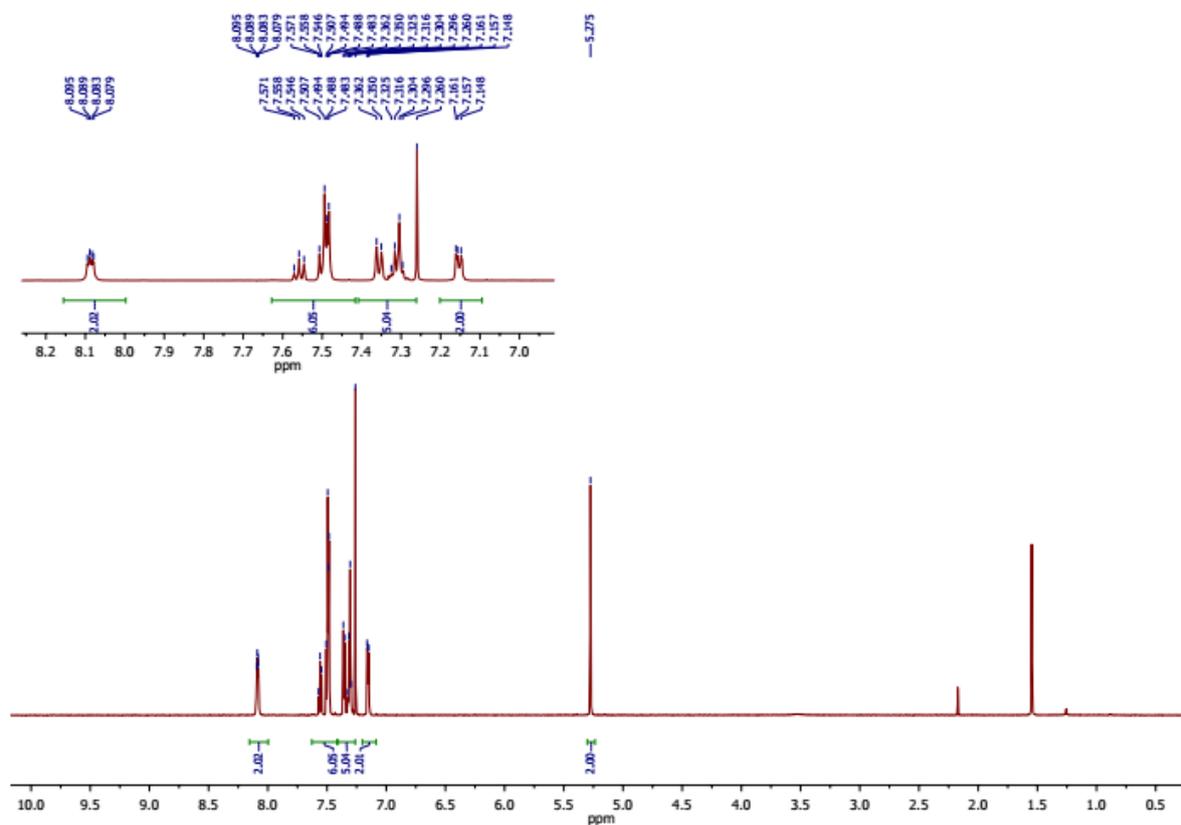


Рис. 2. ЯМР <sup>1</sup>H спектр N-бутил-3,5-дифенил-4-нитропиразола

В ЯМР <sup>1</sup>H спектре N-бутил-3,5-дифенил-4-нитропиразола в сильном поле наблюдается сигнал протонов метиленовой группы в области  $\delta$  5,27 м.д. в виде синглета. В слабом поле с химическим сдвигом  $\delta$  7,14-8,09 м.д. наблюдаются сигналы ароматических колец в виде мультиплетов. На спектре отсутствует сигнал протона при атоме азота пиразольного кольца, который находится в более слабом поле в области 12,49 м.д.

Таким образом, нами был синтезирован ранее неизвестный N-бутил-3,5-дифенил-4-нитропиразола, структура которого доказана данными ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопии.

### Библиографические ссылки

1. Солдатенков А.Т. Основы органической химии лекарственных веществ [Текст] / А.Т. Солдатенков, Н.М. Колядина, И.В. Шендрик. 2-е изд., испр. и доп. М.: Мир, 2003. 191 с.
2. Гончаров Е. В. Нитрозогетероциклические соединения в качестве модификаторов эластомерных композиций: автореф. дис. канд. техн. наук / ИГХТУ. Иваново: ИГХТУ, 2009. 16 с.
3. Машковский М. Д. Лекарственные средства [Текст]: Пособие по фармакологии для врачей. Том 2 / М.Д. Машковский. М.: ООО «Издательство Новая Волна». 2002. 608 с.
4. А.В. Боброва, А.Д. Раджабов, Е.В. Роот, Г.А. Субоч. Изучение алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола 1-бромбутаном // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб.

материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (23-24 апреля 2020 г., Красноярск) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. С. 437–438.

5. Казицына Л.А, Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и Масс-спектропии в органической химии / Издательство Московского Университета. Изд. 2-е, перераб и доп. Москва. 1979.

### References

1. Soldatenkov A.T. Fundamentals of organic chemistry of medicinal substances [Text] / A.T. Soldatenkov, N.M. Kolyadina, I.V. Shendrik. 2nd ed., ispr. and add. M.: Mir, 2003. 191 p.

2. Goncharov E. V. Nitrosoheterocyclic compounds as modifiers of elastomeric compositions: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences / ИИТУ. Иваново: ИИТУ, 2009. 16 p.

3. Mashkovsky M. D. Medicinal products [Text]: Handbook of pharmacology for doctors. Volume 2 / M.D. Mashkovsky. M.: ООО "New Wave Publishing House". 2002. 608 p.

4. A.V. Bobrova, A.D. Rajabov, E.V. Root, G.A. Suboch. The study of alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with 1-brombutane // Young scientists in solving urgent problems of science: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists from international. participation (April 23-24, 2020, Krasnoyarsk) / under the general editorship of Yu. Yu. Loginov; SibGU named after M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2020. pp. 437-438.

5. Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B. Application of UV, IR, NMR and Mass spectroscopy in organic chemistry / Moscow University Press. 2nd ed., revision and addition. Moscow. 1979.

© Кулиева Э. Ш., Поздеева А. Н., Боброва А. В., Рот Е. В., 2022

УДК 547.775

## Н-АЛКИЛИРОВАНИЕ 3,5-ДИМЕТИЛ-4-НИТРОЗО-1Н-ПИРАЗОЛА П-НИТРОБЕНЗИЛБРОМИДОМ

К. Ю. Кучина\*, Т. В. Полиенко, 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: ku4ina.ksusha@ya.ru

*Настоящая работа посвящена N-алкилированию 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола п-нитробензилбромидом. Структура полученного N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола доказано методом ЯМР спектроскопии.*

*Ключевые слова: N-алкилирование, суперосновная среда, нитрозопиразол, ЯМР-спектр.*

## N-ALKYLATION OF 3,5-DIMETHYL-4-NITROSO-1H-PYRAZOLE WITH P-NITROBENZYL BROMIDE

K. Yu. Kuchina\*, T. V. Polienko, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ku4ina.ksusha@ya.ru

*This research describes to the N-alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with p-nitrobenzyl bromide. The structure of the resulting N-(4-nitrobenzyl)-3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole was proved by NMR spectroscopy.*

*Keywords: N-alkylation, superbasic system, nitrosopyrazole, NMR spectrum.*

Синтез алкилпроизводных нитрозопиразолов представляет собой теоретическую и практическую значимость в области органической химии. Это объясняется тем, что полученные вещества используются в качестве фармацевтических препаратов, в сельском хозяйстве, как ингибиторы коррозии и других областях [1].

Один из способов получения N-алкилзамещенных 4-нитрозопиразолов заключается в циклоконденсации изонитрозо-β-дикетонс с алкилгидразинами [2]. Главным недостатком такого метода является использование алкилгидразинов, обладающих канцерогенными свойствами. Обойти данное ограничение позволили разработанные на кафедре ОХТ СибГУ им. М.Ф. Решетнева методики прямого алкилирования пиразольного цикла, что привело к получению неизученных N-замещенных 3,5-диметил-4-нитрозопиразолов [3, 4]. Для одного из исследованных способов синтеза используется натриевая соль исходного пиразола в ацетоне. Второй метод заключается в реакции с соответствующим пиразолом в суперосновной среде. Наиболее высокий выход реакций показал продукт алкилирования 4-нитрозопиразола хлористым бензилом.

Таким образом, представлялось интересным продолжение исследований N-алкилирования с бензильными производными. Известно, что введение электроноакцепторного заместителя в молекулу ароматического соединения понижает плотность электронного облака в кольце, что предположительно может повысить выход целевого продукта N-алкилирования 4-нитрозопиразола.

Поэтому целью нашей работы является проведение N-алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола п-нитробензилбромидом в суперосновной среде и в ацетоне (рис. 1).

*Метод синтеза N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола в ацетоне.* 0,235 г (1,6 ммоль) натриевой соли 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола вводили в 7 мл ацетона, добавляли 0,518 г (2,4 ммоль) п-нитробензилбромида. При нагревании смесь меняла окраску с красной на светло-

зеленую. Реакционную массу кипятили на водяной бане с обратным холодильником в течение 3,5 часов. Растворитель упаривали, продукт очищали методом колоночной хроматографии (силикагель; гексан-этилацетат 50:6). Выход продукта – 0,244 г (59%).

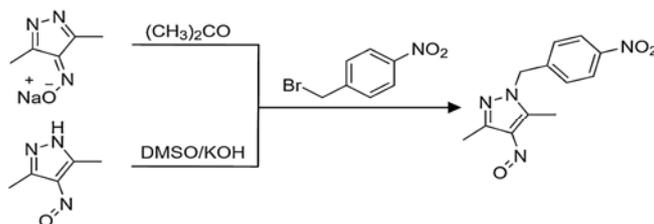


Рис. 1. Схема синтеза  
N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола

*Метод синтеза N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола в суперосновной среде.* 0,2 г (1,6 ммоль) 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола растворяли в 20 мл ДМСО, вводили 0,116 г (2,08 ммоль) измельченного KOH. Выдерживали смесь в течение 1 часа при 75-80 °С при перемешивании. Реакционную массу охлаждали до комнатной температуры и вводили 0,69 г (3,2 ммоль) п-нитробензилбромида. Через 5 минут после добавления алкилирующего агента реакционная масса приобрела темно-зеленый цвет. Контроль реакции осуществляли методом ТСХ (гексан-этилацетат 5:7). Через 5 часов реакционную массу разбавляли 600 мл воды и экстрагировали трихлорметаном (10 мл × 7). Экстракт упаривали, сушили над сульфатом натрия. Продукт очищали методом колоночной хроматографии (силикагель; гексан-этилацетат 50:10). Выход продукта – 0,348 г (84%).

*N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразол:* синие-зеленые кристаллы;  $T_{пл} = 119-122$  °С; ЯМР  $^{13}\text{C}$  ( $\text{CDCl}_3$ ),  $\delta$ , м.д.: 160.33; 148.12; 141.95; 128.11; 124.52; 52.19; 13.16; 10.03.

На ЯМР  $^1\text{H}$  спектре (рис. 2) соединения в  $\text{CDCl}_3$  зарегистрированы протоны метильных групп в сильном поле с химсдвигами 2.35 и 2.86 м.д. Синглет протонов метиленовой группы регистрируется в области 5.38 м.д. Сигналы ароматических протонов в виде дублетов наблюдаются в слабом поле в области 7.37-7.38 м.д. и 8.23-8.25 м.д. [5]. На спектре ЯМР  $^{13}\text{C}$  зарегистрированы сигналы всех ядер атомов углерода, присутствующих в данной молекуле.

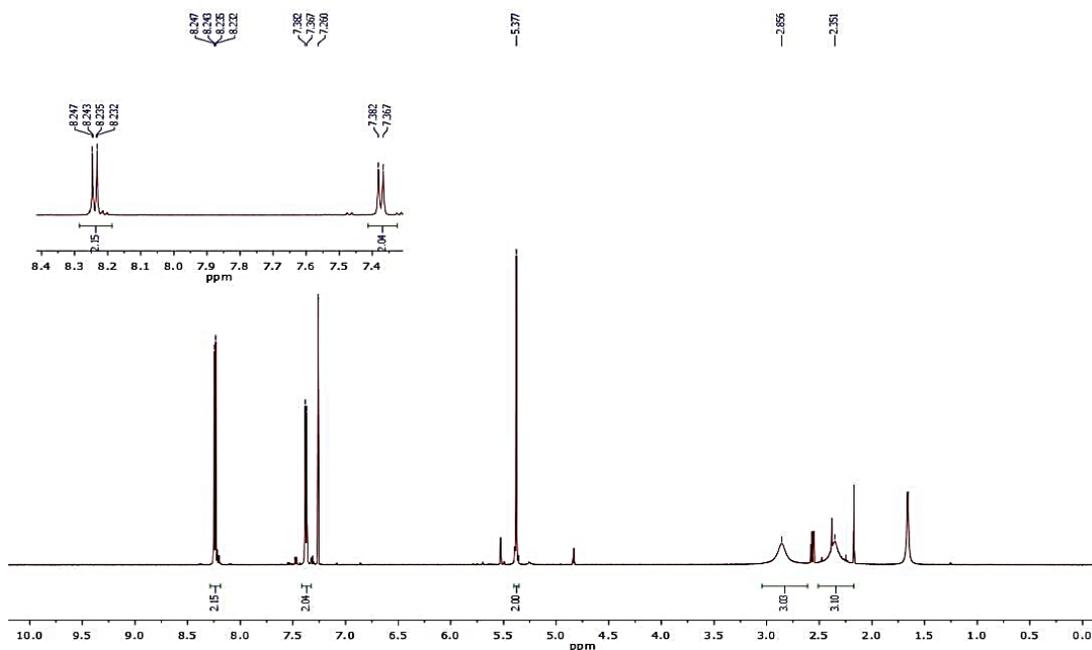


Рис. 2. ЯМР  $^1\text{H}$  спектр N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола в  $\text{CDCl}_3$

Таким образом, нами впервые было проведено N-алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола п-нитробензилбромидом. При использовании п-нитробензилбромида в качестве алкили-

рующего агента выход целевого продукта оказался выше, чем при ранее проведенной реакции с хлористым бензилом. Это объясняется наличием нитрогруппы в молекуле алкилгалогенида. Среди использованных методик наиболее высокий выход N-(4-нитробензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола был получен в суперосновной среде (84 %).

#### Библиографические ссылки

1. McNew G., Sundholm N. The fungicidal activity of substituted pyrazoles and related compounds. *Phytopathology*, 1949. Vol. 39. P. 721–751.
2. Бобров П.С., Андреева А.В., Любяшкин А.В. Синтез 1-нафтилзамещенных нитропиразолов // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (8–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 38–39.
3. Изучение алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1H-пиразола 1-бромбутаном / А.В. Боброва, А.Д. Раджабов, Е.В. Рот, Г.А. Субоч // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник статей студентов и молодых ученых. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020, 437-438 с.
4. Алкилирование и ацилирование 4-нитрозо-1H-пиразолов / А.В. Боброва, А.Н. Поздеева, Э.Ш. Кулиева, Е.В. Рот // 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.
5. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М. : Мир, 1984. 478 с.

#### References

1. McNew G., Sundholm N. The fungicidal activity of substituted pyrazoles and related compounds. *Phytopathology*, 1949. Vol. 39. P. 721–751.
2. Bobrov P.S., Andreeva A.V., Lyubyashkin A.V. Synthesis of 1-naphthyl-substituted nitrosopyrazoles // Reshetnevskie readings: materials of XXI Intern. scientific conf. (November 8-11, 2017, Krasnoyarsk): Siberian State University named after M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2017, pp. 38–39.
3. Study of alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with 1-bromobutane / A.V. Bobrova, A.D. Radzhabov, E.V. Root, G.A. Suboch // 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, 2020, 437-438 p.
4. 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.
5. Gunter H. Introduction to the course of NMR spectroscopy. Moscow, Mir, 1984, 478 p.

© Кучина К. Ю., Полиенко Т. В., Субоч Г. А., 2022

УДК 678.7-1

## ОЦЕНКА ПРИМЕСЕЙ В МОНОМЕРАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, МЕТОДОМ ЯМР

С. И. Левченко<sup>1\*</sup>, В. Р. Пен<sup>1</sup>, Ю. В. Чижов<sup>2</sup>, Л. Е. Маскадынов<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 государственный медицинский университет  
имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого  
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, зд. 1

\*E-mail: levchenko167@inbox.ru

*Методом ЯМР проведен качественный и количественный анализ примесей в мономерах, используемых для получения стоматологических изделий, которые необходимо учитывать при получении калибровочных кривых для спектрофотометрии.*

*Ключевые слова: стоматологические пластмассы, примеси, остаточные мономеры.*

## EVALUATION OF IMPURITIES IN MONOMERS USED IN OBTAINING DENTAL PRODUCTS BY NMR METHOD

S. I. Levchenko<sup>1\*</sup>, V. R. Pen<sup>1</sup>, Y. V. Chijov<sup>2</sup>, L. E. Mascadynov<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>Voyno-Yasenetsky's Krasnoyarsk State Medical University  
1, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

\*E-mail: levchenko167@inbox.ru

*Qualitative and quantitative analysis of impurities in the monomers used to obtain dental products was carried out using the NMR method, which must be taken into account when obtaining calibration curves for spectrophotometry.*

*Keywords: dental plastics, impurities, residual monomers.*

В настоящее время содержание остаточного мономера в полимерных зубопротезных конструкциях из полиметилметакрилата является одним из основных критериев качества материала. Однако, такой показатель ничего не говорит о динамике и количестве свободного акрилата, попадающего из изделия в полость рта. Причина заключается в том, что остаточный мономер в полимерном материале может находиться в двух формах – свободной и связанной, но только свободный мономер способен диффундировать из пластмассы в окружающую среду. Поэтому при оценке безопасности изготавливаемых стоматологических изделий важнее определять не суммарное содержание остаточного мономера, а только то его количество, которое потенциально способно диффундировать из полимерного матрикса. В настоящее время наиболее распространенным является фотоколориметрический метод определения акриловых мономеров в водных объектах [1-3].

Одним из важнейших этапов фотоколориметрического метода анализа является построение калибровочной кривой. Для этого используются исходные мономеры метилметакрилата (ММА), вступающие в реакцию полимеризации [4, 5].

Предполагается, что содержание исходного мономера составляет 100%. Однако на практике это положение не выполняется, что приводит к неточностям в калибровке и, соответственно, в определении концентрации остаточного мономера в стоматологическом изделии. Для определения количества и состава примесей в работе использовался метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Изучались следующие полимерные композиции: Sample 1 – Vertex; Sample 2 – Protakril; Sample 3 – Belakril-M XO; Sample 4 – Etakril; Sample 5 – Ftorex.

Запись спектров протонного магнитного резонанса производили на спектрометре AVANCE III600 на частоте 600 МГц в стандартных 5 мм ампулах. В ампулу помещали 0.2 мл образца, растворяли в 1.5 мл дейтерированного хлороформа и выдерживали не менее 30 мин до получения однородного раствора. Спектры получены суммированием 16 проходов и Фурье-преобразованием полученного сигнала. Использовали диапазон химических сдвигов от – 0.5 до 15 м.д. Для получения достоверной количественной оценки использовали однократные импульсы, соответствующие повороту вектора намагниченности ( $\pi/6$ ). Релаксационная задержка между прохождениями 7 с.

Анализ ЯМР спектров представленных образцов свидетельствует о наличии во всех случаях преимущественно мономерной формы метилметакрилата, однако дополнительно присутствуют другие соединения, относительное содержание которых достигает значительных величин (см. таблицу).

**Доля содержания различных соединений в исходных жидких компонентах (мономеры) по отношению к содержанию метилметакрилата по данным спектров ЯМР**

Соединение, входящее в состав мономера	Содержание примесей в составе исследуемые мономеры для полимерных композиций				
	Протокрил	Вертекс	Белакрил	Этакрил	Фторекс
Метилметакрилат	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Замещенный метилметакрилат	0,025-0,05	0,05-0,1	-	0,17-0,34	0,025-0,05
вода	0,03-0,06	0,1	0,05-0,1	0,05-0,1	0,05-0,1
фталат	0,005-0,01	-	-	-	-

Можно расположить жидкие компоненты мономеров базисных акриловых пластмасс, в зависимости от содержания в образцах основного компонента (метилметакрилата), в следующем порядке:

1 – мономер «белакрил» – содержание основного вещества (метилметакрилата) 98.8%, вода 1.2%. Паспортные данные: 100% содержание основного вещества (метилметакрилата);

2 – мономер «фторекс» – метилметакрилата 95%, вода 1.2%, замещенный ММА 4%. Паспортные данные: 97% содержание основного вещества (метилметакрилата);

3 – мономер «протакрил» – метилметакрилата 94%; вода 0.8% , замещенный ММА 4%, фталат 1%. Паспортные данные: 96% содержание основного вещества (метилметакрилата);

4 – мономер «вертекс» – метилметакрилата 93%, вода 1.2%, замещенный ММА 6%;

5 – мономер «этакрил» – метилметакрилата 74%, вода 1.2%, замещенный ММА 25%. Паспортные данные: 80% содержание основного вещества (метилметакрилата).

Как следует из представленных результатов, реальное содержание основного компонента (метилметакрилата) во всех случаях меньше содержания ММА в образцах согласно данным от производителя мономеров (паспортные данные). Прежде всего, это связано с наличием воды в представленных образцах мономера, как не учитываемого компонента.

Анализ результатов ЯМР спектроскопии, указывает на наличие в образцах различных содержаний замещенных метилметакрилата (замещенный ММА). В этих соединениях один протон метильной группировки метилметакрилата замещен на компонент не содержащий протонов (например фтор и др. галогены и т.д.). Согласно литературным источникам подобные соединения действительно используются как встраиваемые звенья модифицированной цепи на основе акриловых пластмасс [1]. Это модифицирует свойства базисных акриловых пластмасс и ускоряет формирование полимера, что и позволяет получать различные стоматологические материалы («протакрил», «вертекс», «бесцветная», «этакрил», «фторекс» и т. д.).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что исходные мономеры для получения стоматологических изделий имеют примеси, количество которых необходимо учитывать при построении калибровочных кривых для фотоколориметрического метода определения акриловых мономеров в водных объектах.

Использование современных ЯМР спектрометров позволяет определить состав мономерных компонентов базисных акриловых пластмасс. Это дает возможность определить наиболее подходящий компонент для получения более точных калибровочных графиков, сопоставить качество стоматологических изделий с исходным составом этих мономеров.

### Библиографические ссылки

1. Рыбакова А. Н. Материаловедение в стоматологии. М. : Медицина, 1984. 345 с.
2. Изучение диффузных процессов в ПВХ пластикатах и полиакрилатах / Л. В. Ладыгина, Карнакова О. В., Калмыков В. В. и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6. № 1. С. 163 165.
3. Влияние различных факторов на свойства базисного стоматологического полимерного материала / Я. В. Костров, Белоконова Н. А., Жолудев С. Е. и др. // Проблемы стоматологии. 2016. Т. 12. №1. С. 78 84.
4. Спектрофотометрическое определение метилметакрилата как способ контроля качества стоматологических изделий / Н. В. Власова, Кузьмин Г. В., Блинникова А. В. // Вестник ОмГУ. 1999. Вып.1. С. 33 34.
5. Дорогова В. Б., Игнатьева Л. П. Методы фотометрического анализа в санитарно-гигиенических исследованиях. М. : Издательский дом «Академия Естествознания», 2013. 102 с.

### Referenses

1. Rybakova A. N. *Materialovedeniye v stomatologii* [Materials science in dentistry]. Moscow, Medicine, 1984. 345 p.
2. Ladygina L. V., Karnakova O. V., Kalmykov V. V., Shutilin Yu. F., Ivannikov V. A. [Study of diffuse processes in PVC plastic compounds and polyacrylates] *Sorption and chromatographic processes*. 2006, v. 6, no. 1, p. 163 165 (In Russ.).
3. Kostrov Ya. V., Belokonova N. A., Zholudev S. E., Vshivkov S.A., Galyas A. G. [Influence of various factors on the properties of the basic dental polymeric material] / *Problems of Dentistry*, 2016, vol.12, no. 1, p.78 84 (In Russ.).
4. Vlasova N. V., Kuzmin G. V., Blinnikova A. V. [Spectrophotometric determination of methyl methacrylate as a method of quality control of dental products]. *Vestnik OmGU*. 1999, Issue 1. p. 33 34 (In Russ.).
5. Dorogova V. B., Ignatieva L. P. *Metody fotometricheskogo analiza v sanitarno-gigiyenicheskikh issledovaniyakh* [Methods of photometric analysis in sanitary and hygienic research]. Moscow, Publishing House "Academy of Natural History", 2013. 102 p.

© Левченко С. И., Пен В. Р., Чижов Ю. В., Маскадынов Л. Е., 2022

УДК 547.773 + 547.853.3

## ЦИКЛОКОНДЕНСАЦИЯ 2-ГИДРАЗНИЛПИРИМИДИНА С 2-ГИДРОКСИМИНО-1,3-ДИФЕНИЛПРОПАН-1,3-ДИОНОМ

Д. К. Нижибовская\*, Я. И. Агеев, 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: nig\_dasha@mail.ru

*Циклоконденсацией замещенного 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом впервые синтезирован 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол. Структура полученного соединения подтверждено методом электронной спектроскопии.*

*Ключевые слова: циклоконденсация, пиразол, пиримидин, нитрозопиразол, электронная спектроскопия.*

## CYCLOCONDENSATION OF 2-HYDRAZINYL PYRIMIDINE WITH 2-HYDROXYMINO-1,3-DIPHENYLPROPANE-1,3-DIONE

D. K. Nizhibovskaya\*, Y. I. Ageev, P. S. Bobrov, G. A. Suboch

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-1,3-diphenylpropane-1,3-dione. A previously unknown 3,5-diphenyl-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, nitroso pyrazole, electron spectroscopy.*

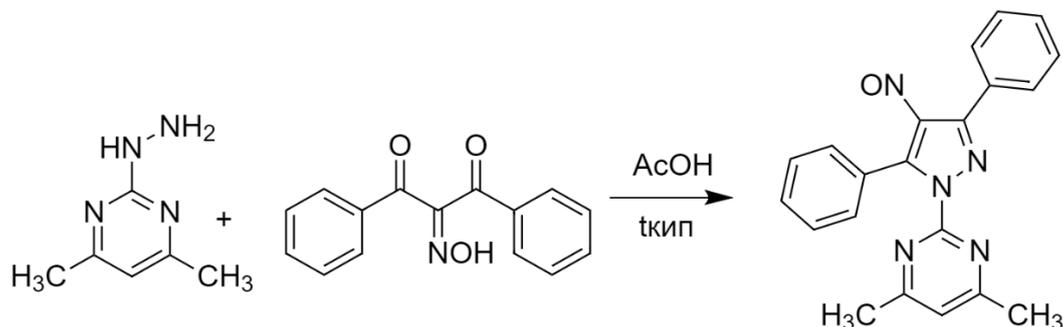
В настоящее время пиримидилпиразолы и их производные вызывают интерес благодаря своей биологической активности, такой как: противотуберкулезная [1], цитопротективная [2], противовоспалительная [3] и противодиабетическая [4].

Значительный вклад в биологическую активность вносят азотсодержащие функциональные группировки в 4-ом положении пиразольного цикла, введение которых известными методами зачастую предполагает использование жестких условий и может идти не селективно. Ранее на нашей кафедре было показано, что гетарилгидразины способны вступать в циклоконденсацию с изонитрозодикетонами с образованием N-гетарил-4-нитрозопиразолов, что позволило устранить недостатки, возникающие при введении азотсодержащих групп [5-6]. Однако, до сих пор не была изучена циклоароматизация 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом, в результате которой может быть получен неизвестный ранее пиримидилзамещенный 4-нитрозопиразол.

Введение нитрозогруппы в 4-е положение пиразольного цикла позволит осуществлять переход к другим классам органических соединений с полезной биологической активностью. Так, известны 4-азопиразолы, обладающие противоопухолевой активностью [7], и 4-ацетамидопиразолы – антиглаутомной [8]. Поэтому целью настоящей работы стало изучение циклоконденсации замещенного 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом (см. рисунок), а также подтверждение строения продукта реакции.

Для синтеза пиримидилзамещенного 4-нитрозопиразола были получены 4,6-диметил-2-гидразинилпиримидин и 2-гидроксимино-1,3-дифенилбутан-1,3-дион по известным методикам.

Циклоконденсация успешно осуществляется в среде уксусной кислоты. Наилучший выход ранее неизвестного пиразола был достигнут при кипячении в течение 1 ч (18%). Схема синтеза изображена на рисунке.



Синтез 3,5-дифенил-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразола

Продукт был выделен в виде зеленых игольчатых кристаллов, растворимый в ацетонитриле, толуоле и хлороформе. Строение впервые полученного соединения подтверждено методом электронной спектроскопии. На электронном спектре соединения присутствуют максимумы поглощения нитрозогруппы в видимой области, обусловленные  $n \rightarrow \pi$  переходом неподелённой электронной пары атома азота.

#### Экспериментальная часть.

##### 3,5-Дифенил-4-нитрозо-1-(4,6-диметилпиримидин-2-ил)пиразол:

В колбу загружали при перемешивании 2-гидроксиимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дион (0,556 г, 0,0022 моль), 2-гидразинил-4,6-диметилпиримидин (0,276 г, 0,002 моль) и 8 мл уксусной кислоты, кипятили в течении 1 ч. По окончании реакции раствор темно-зеленого цвета охлаждали, выливали в воду и экстрагировали хлороформом (15 мл  $\times$  4). 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 = 50: 1). Выход 0,013 г (18%), зеленые игольчатые кристаллы, Т. пл. = 132-135°C (CCl<sub>4</sub>). Электронный спектр (CHCl<sub>3</sub>),  $\lambda_{(max)}$ , нм ( $\epsilon$ ): 734 (71).

#### 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. 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.
4. Mahesh V. K., et al. Syntesis of Some Pyrimidinylpyrazolos and Pyrimidinyl-2-Pyrazoline-5-Ones // J. Indian Chem. Soc. 1980. Т. 57. №10. p. 1037-1038.
5. 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.
6. Нижибовская Д., Агеев Я., Бобров П. Циклоконденсация 2-гидразинилхиноксалина с 2-гидроксиимино-1,3-дикетонами. Сборник Всероссийской конференции «Лесной и химической 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.
7. Karadia 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.

8. Mert S. et al. Novel pyrazole-3, 4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors // *Arabian Journal of Chemistry*. 2019. T. 12. №. 8. P. 2740-2748.

### References

1. Kenzo S. [2-(Pyrazol-1-yl)-pyrimidine derivatives]. Patent US, no. 3040047, 1962.
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, vol. 45, no. 3, p. 549-551.
3. 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, vol. 24, №. 6, p. 1605-1610.
4. Mahesh V. K., et al. Syntesis of Some Pyrimidinylpyrazolos and Pyrimidinyl-2-Pyrazoline-5-Ones // *J. Indian Chem. Soc.*, 1980, vol. 57, no. 10, p. 1037-1038.
5. Zubov I.A., Bobrov P.S., Ageev Y.I., Nizhibovskaya D.K., Suboch G.A. [Cyclocondensation of 2-hydroxyimino-1,3-diphenylpropane-1,3-dione with 2-hydrazinylbenzothiazole]. *Materialy XXV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2022, p. 642–643. (In Russ.)
6. Nizhibovskaya D.K., Ageev Y.I., Bobrov P.S. [2-Hydrazinylquinoxaline with 2-hydroximino-1,3-diketones cyclocondensation]. *Sbornik Vserossiyskoy konferentsii «Lesnoy i khimicheskiy komplekсы problemy i resheniya* [Collection of the All-Russian conference "Forest and chemical complexes problems and solutions"]. Krasnoyarsk, 2022, vol. 1, p. 463-466. (In Russ.)
7. Kapadia G. J. et al. Cancer chemopreventive activity of synthetic colorants used in foods, pharmaceuticals and cosmetic preparations // *Cancer letters*, 1998, vol. 129, no. 1, p. 87-95.
8. Mert S. et al. Novel pyrazole-3, 4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors // *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12, no. 8, p. 2740-2748.

© Нижибовская Д. К., Агеев Я. И., Бобров П. С., Субоч Г. А., 2022

УДК 66.087.2 676.164.3.023.1

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АГЕНТОВ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ**

В. Р. Пен\*, С. И. Левченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
 \*E-mail: 2507@inbox.ru

*Рассмотренный способ делигнификации древесины с использованием электрохимической генерации надуксусной кислоты и пероксида водорода позволяет интенсифицировать процесс и регулировать его скорость изменением тока на газодиффузионном электроде.*

*Ключевые слова: делигнификация, надуксусная кислота, пероксид водорода, электрохимическая генерация.*

**ELECTROCHEMICAL GENERATION OF WOOD DELIGNIFICATION AGENTS**

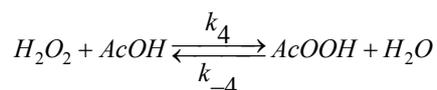
V. R. Pen\*, S. I. Levchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 \*E-mail: 2507@inbox.ru

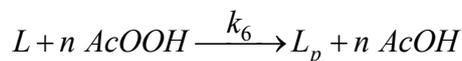
*The considered method of wood delignification using electrochemical generation of peracetic acid and hydrogen peroxide makes it possible to intensify the process and control its rate by changing the current on the gas diffusion electrode.*

*Keywords: delignification, peracetic acid, hydrogen peroxide, electrochemical generation.*

Пероксидная варка, в настоящий момент, рассматривается как экологически безопасная альтернатива существующим методам делигнификации. Введение в варочный раствор уксусной кислоты позволяет получить дополнительный и весьма эффективный делигнифицирующий агент – надуксусную кислоту, образующуюся действием пероксида на уксусную кислоту:

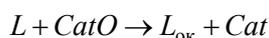


Первоначально варку надкислотами проводили в растворе, состоящем из органической кислоты типа  $RCOOH$  и пероксида водорода, при атмосферном давлении и температуре от 60 до 100 °С [1]. Процесс ускоряется в присутствии серной кислоты, но при этом снижается выход полуфабриката [2]. Делигнификация протекает по схеме:

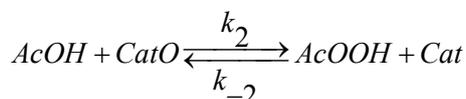


где  $L$  и  $L_{ок}$  – соответственно лигнин и продукты его окисления).

Пероксидная варка ускоряется в присутствии соединений металлов переменной валентности, в частности, молибдена и вольфрама. Механизм действия катализаторов включает образование пероксокомплексов  $CatO$ , которые переносят активный кислород от пероксида водорода к субстрату [3]:



В присутствии катализатора образование надкислоты ускоряется [3].



Систематическое исследование делигнификации древесины органическими надкислотами выполнили В. Резников, М. Зильберглейт и др. [2, 4]. Одной из проблем, возникающих при использовании надкислот, является получение реагента заданной концентрации без последующего концентрирования. Поэтому первоначально были выполнены исследования образования надуксусной и надмуравьиной кислот в реакционной смеси из 30 %-ного водного раствора пероксида водорода (пергидроля), концентрированных уксусной или муравьиной кислот и воды, взятых в разных соотношениях [5]. В качестве катализатора использовалась серная кислота.

Предложен состав, включающий в себя уксусную кислоту, пероксид водорода,  $Na_2WO_4$ . Входящий в состав варочного раствора катализатор проблему решает, но он дорог и требует процедуры регенерации. В то же время известен электрохимический синтез надкислот на газодиффузионных электродах [6].

Была создана установка для отбеливания целлюлозы, в которой катодит с фиксированным содержанием пероксида водорода и надкислоты непрерывно прокачивался через реактор, содержащий небеленую целлюлозу, и возвращался в катодное пространство электролизера с пористым гидрофобизированным электродом для обогащения израсходованных пероксида водорода и надуксусной кислоты. Эксперимент показал, что белизна целлюлозы напрямую коррелирует с количеством электричества, пропущенного через электролизер.

Таким образом можно сделать вывод о том, что сочетание электрохимической генерации пероксида водорода и надуксусной кислоты с традиционной пероксидной системой позволяет вести процесс делигнификации древесины с возможностью регулирования скорости последнего за счет изменения величины тока электролизера.

#### Библиографические ссылки

1. Никитин В. М. Теоретические основы делигнификации. М. : Лесная пром-сть, 1981. 296 с.
2. А. с. 761647 СССР, МПК 21 С 3/04. Способ получения целлюлозного полуфабриката / Резников В. М., Зильберглейт М. А. № 2573365/29-12 ; заявл. 30.01.1978 ; опубл. 30.09.1980, Бюл. № 27. 3 с.
3. Пен В. Р. Кинетика делигнификации хвойной древесины перуксусной кислотой / В. Р. Пен и др. // Ж. прикл. химии. 1999. Т. 72. Вып. 9. С. 1541 1545.
4. Пат. 2019609 Российская Федерация, МПК D 21 С 3/20, D 21 С 3/04. Способ получения целлюлозного полуфабриката из древесины лиственных пород / Зильберглейт М. А., Смолова Н. В., Симхович Б. С. № 5041324/12 ; заявл. 24.02.1992 ; опубл. 15.09.1994, Бюл. № 4. 4 с.
5. Зильберглейт М. А. Изучение реакции получения надуксусной кислоты на диаграмме состав-свойство / М. А. Зильберглейт // Изв. АН БССР. Сер. Хим, 1979. № 5. С. 125 128.
6. Колягин, Г.А. Образование надкислот из соответствующих органических кислот при электровосстановлении кислорода в газодиффузионном электроде / Г. А. Колягин, Васильева И. С., Корниенко В. Л. // Электрохимия. 2010. Том 46. №8. С. 1018 1020.

#### References

1. Nikitin V. M. *Teoreticheskiye osnovy delignifikatsii*. [Theoretical foundations of delignification]. Moscow, Lesnaya prom-st., 1981, 296 p.
2. Reznikov V. M., Zilbergleit M. A. *Sposob polucheniya tsellyuloznogo polufabrikata* [The method of obtaining a cellulose semi-finished product] A. s. USSR, no. 761647, 1978
3. Pen V. R. [Kinetics of coniferous wood delignification by peracetic acid]. *J. prikl. khimii*. 1999, vol. 72, issue. 9, p. 1541 1545 (In Russ.).
4. Zilbergleit M. F., Smolova N. V. *Sposob polucheniya tsellyuloznogo polufabrikata iz drevesiny listvennichnykh porod* [A method of obtaining a cellulose semi-finished product from larch wood]. Patent RF, no. 5041324/12, 1992.
5. Zilbergleit M. A. [Study of the reaction of obtaining peracetic acid on the composition-property diagram]. *Izv. AN BSSR., Ser. Khim.* 1979, no. 5, p. 125 128 (In Russ.).
6. Kolyagin G. A. [The formation of peracids from the corresponding organic acids during the electroreduction of oxygen in a gas diffusion electrode]. *Electrochemistry*. 2010, volume 46, no. 8, p. 1018 1020 (In Russ.).

УДК 541.127:662.1

## ТЕРМОРАСПАД 1,3,5,7-ТЕТРАНИТРО-1,3,5,7-ТЕТРААЗАЦИКЛООКТАНА В ПРИСУТСТВИИ СЕЛЕНАТА И ТЕТРАБОРАТА АММОНИЯ

К. В. Пехотин\*, О. А. Голубцова, Л. А. Круглякова

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

*Термораспад 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ), энергетического компонента твердых ракетных топлив, мало чувствителен к введению добавок селената и тетрабората аммония.*

*Ключевые слова: термораспад, 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктан, аммония селенат, аммония тетраборат, катализ.*

## THERMAL DECOMPOSITION OF 1,3,5,7-TETRANITRO-1,3,5,7-TETRAAZACYCLOOCTANE IN AMMONIUM SELENATE AND AMMONIUM TETRABORATE PRESENCE

K. V. Pekhotin\*, O. A. Golubtsova, L. A. Kruglyakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail pekhotinkv@sibsau.ru

*Thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane (HMX), the energetic component of solid rocket propellants, is weak sensitive to addition of ammonium selenate and ammonium tetraborate.*

*Keywords: thermal decomposition, 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane, ammonium selenite, ammonium tetraborate, catalysis.*

**Введение.** Поиск катализаторов и модификаторов термораспада 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ), энергетического компонента твердых ракетных топлив, способствует решению проблемы повышения эффективности нитраминных топлив и регулирования скорости их горения. В работах [1-3] было показано, что термическое разложение октогена в присутствии некоторых комплексных солей переходных металлов и аммонийных солей начинается при более низких температурах. В продолжение этих работ нами изучено термическое разложение НМХ с добавками селената и тетрабората аммония в неизотермических условиях при разных скоростях нагрева образцов.

**Результаты и их обсуждение.** Термораспад НМХ с добавкой селената и тетрабората аммония проводился в неизотермических условиях на дериватографе Q-1500D при скоростях нагревания 1,25; 2,5; 5 и 10 град/мин от комнатной температуры до 500°C. Масса навески составляла 10 мг. Образец готовили путем совместной кристаллизации из ацетона. Соотношение добавки и НМХ составляло 5:95 (масс. ч.).

Было установлено, что термораспад образцов с селенатом и тетраборатом аммония, как и в случае чистого НМХ, протекает в твердой фазе, и на дериватограммах отсутствует эндотермический пик, соответствующий фазовому переходу. Термограмма процесса при скорости нагрева 5 град/мин представлена на рис. 1. На рис. 2 приведен совмещенный график тепловыделения изученных образцов при скорости нагрева 10 град/мин.

Найденные температуры начала,  $T_{нр}$ , и интенсивного разложения,  $T_{max}$ , (соответствующие максимуму на кривой теплового эффекта), а также рассчитанные методами Озава [4] и Киссинджера [5] по

зависимости  $T_{\max}$  от скорости нагрева активационные параметры приведены в таблице. Здесь же представлены данные для чистого НМХ.

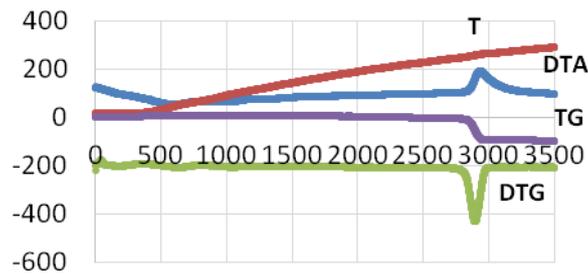


Рис. 1. Термограмма образца НМХ с добавкой  $(\text{NH}_4)_2\text{SeO}_4$  при скорости нагрева 5 град/мин

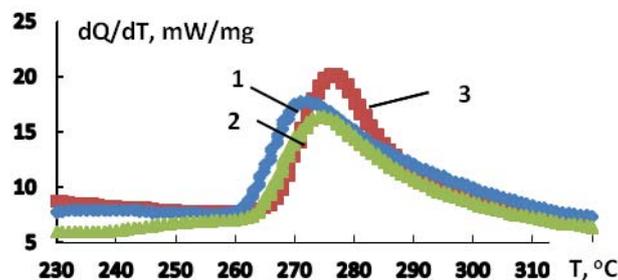


Рис. 2. Дифференциальные кривые тепловыделения при скорости нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ :  
1 – НМХ; 2 – НМХ+ $(\text{NH}_4)_2\text{SeO}_4$ ; 3 – НМХ+ $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7$

#### Характеристические температуры и активационные параметры термораспада НМХ с добавкой в неизотермических условиях

Добавка	Скорость нагрева, $^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$	$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$E$ [кДж/моль]		lg A (метод Киссинджера)
				метод Озавы	метод Киссинджера	
без добавки	2,5	254	262,5	213,9	211,9	20,29
	5,0	256	266,5			
	10,0	262	276			
$(\text{NH}_4)_2\text{SeO}_4$	1,25	231	249	193,57 1	192,37	20,21
	2,5	246	256			
	5	252	261			
	10	263	273,5			
$(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7$	1,25	250	256,5	266,3	271,2	27,66
	2,5	257,5	264,5			
	5,0	259,5	267,5			
	10,0	262	271			

Из рис. 2 и данных таблицы видно, что аммонийные соли селеновой и тетраборной кислот, что хотя и приводят к снижению температур начала и интенсивного разложения, но это снижение не столь существенно. Вероятно, это связано с тем, что массовая доля катиона аммония в этих солях меньше, чем в изученных ранее нитрате, формиате и нитротриазолате аммония [1-3], поэтому и концентрация образующегося аммиака ниже, чем при распаде этих добавок. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что в присутствии селената аммония октоген разлагается при более низких температурах, чем в случае тетрабората.

Найденные кинетические параметры позволяют предсказывать термическую стабильность НМХ с добавкой селената и тетрабората аммония при различных температурах.

### Библиографические ссылки

1. Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Дударева Е. Д. Влияние формиата аммония на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана // 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.
2. Вдовин А. В., Голубцова О. А., Пехотин К. В., Круглякова Л. А. Влияние ониевых солей 3-нитро-1,2,4-триазола и 3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил-нитрометана на термическое разложение октогена // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов VI Всеросс. научно-техн. конф. молодых ученых, Бийск, 2016. С. 104-107.
3. Влияние аммониевой и гидразиниевой солей 1-нитрометил-3-нитро-1,2,4-триазола на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана / Вдовин А. В., Аревкова К. С., Голубцова О. А., Пехотин К. В., Круглякова Л. А. // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Сборник статей студентов, аспирантов и молодых ученых по итогам Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Красноярск. 2016. Т. 2. С. 122-125.
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. 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.).
2. Vdovin A. V., Golubtsova O. A., Pekhotin K. V., Kruglyakova L. A. [Effect of onion salts of 3-nitro-1,2,4-triazole and 3-nitro-1,2,4-triazole-1-yl-nitromethane on thermal decomposition of octogen] // Prospects for the creation and application of condensed high-energy materials VI All-Russian science and technical Conf. of Young Scientists, Biysk, 2016. P. 104-107. (In Russ.).
3. [Effect of ammonium and hydrazine salts of 1-nitromethyl-3-nitro-1,2,4-triazole on thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane] / Vdovin A. V., Arevkova K. S., Golubtsova O. A., Pekhotin K. V., Kruglyakova L. A. // Materials of All-Russian Scientific and Practical Conf (with international participation) "Young scientists in solving urgent problems of science". Krasnoyarsk, 2016. V. 2. P. 122–125. (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.

© Пехотин К. В., Голубцова О.А., Круглякова Л. А., 2022

УДК 547.773

## ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СТРОЕНИЯ N-ПРОПИЛ-3,5-ДИФЕНИЛ-4-НИТРОЗОПИРАЗОЛА С ПОМОЩЬЮ ЯМР $^1\text{H}$ СПЕКТРОСКОПИИ

А. Н. Поздеева\*, Э. Ш. Кулиева, 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: al.pozdeeva.98@mail.ru

*В данной работе изучено строение N-пропил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола с помощью ЯМР  $^1\text{H}$  спектроскопии.*

*Ключевые слова: 4-нитрозопиразол, идентификация, протонный ядерный магнитный резонанс.*

## PROOF OF THE STRUCTURE OF N-PROPYL-3,5-DIPHENYL-4-NITROSOPYRAZOLE USING $^1\text{H}$ NMR SPECTROSCOPY

A.N. Pozdeeva\*, E.Sh. Kulieva, A.V. Bobrova, E.V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: al.pozdeeva.98@mail.ru

*In this work, the fine structure of N-propyl-3,5-diphenyl-4-nitrosopyrazole was studied using  $^1\text{H}$  NMR spectroscopy.*

*Keywords: 4-nitrosopyrazole, identification, proton nuclear magnetic resonance.*

Известно, что производные пиразолов обладают значительным болеутоляющим, противовирусным и бактериостатическим действием [1-2]. Введение алкильного остатка в структуру подобных соединений позволит придать новые свойства синтезированным веществам, что позволит увеличить их потенциальную биологическую активность.

Ранее нами была показана возможность N-алкилирования 3,5-дифенил-4-нитрозопиразола эквивалентным количеством 1-бромпропана в присутствии ДМСО и КОН (рис.1) [3]. Однако доказательство строения полученного нитрозосоединения с помощью ЯМР  $^1\text{H}$  спектроскопии не было установлено. Поэтому целью работы является идентификация N-пропил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола с помощью спектроскопии протонного ядерного магнитного резонанса.

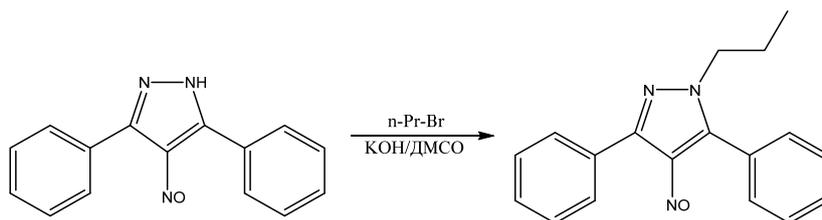


Рис. 3. Получение N-пропил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола

Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  полученного соединения записывали в дейтерохлороформе на приборах Bruker Avance III 600 с применением ТМС в качестве внутреннего стандарта [4-5].

В ЯМР  $^1\text{H}$  спектре N-пропил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола в сильном поле наблюдаются сигналы протонов метильной группы в виде триплета  $\delta$ , 0.87-0.89 м.д., секстет сигналов протонов метиленовой группы, находящейся рядом с метильной группой, в области  $\delta$ , 1.90-1.96 м.д., сигналы протонов метиленовой группы при атоме азота пиразольного ядра в виде триплета  $\delta$ , 4.01-4.03 м.д. В области слабого поля присутствуют сигналы протонов фенильных колец  $\delta$ , 7.42-8.07 м.д. В характерной области  $\delta$ , 12.49 м.д. отсутствует сигнал протона, соответствующий NH-группе пиразольного кольца.



УДК 66.092:621.791.048

## ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ФЛЮСА, ДИФТАЛАТА БЕТУЛИНОЛА

Н. И. Полежаева, В. А. Вольф

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Комплексным термическим анализом флюса, дифталата бетулинола, на воздухе показано, что термоокислительная деструкция протекает в две стадии в интервале температур 165 – 460<sup>0</sup>С, с потерей 79,6% исходной массы.*

*Ключевые слова: пайка, паяльная паста, флюс, дифталат бетулинола, термоокислительная деструкция.*

## THERMO-OXIDATIVE DESTRUCTION OF FLUX, BETULINOL DIPHTHALATE

N. I. Polezhaeva, V. A. Wolf

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Comprehensive thermal analysis of the flux, butulinol diphthalate, in air showed that thermal-oxidative degradation proceeds in two stages in the temperature range of 165-4600C, with a loss of 79.6% of the initial mass.*

*Keywords: soldering, solder paste, flux, betulinol diphthalate, thermal oxidative degradation.*

При смачивании припоем возникает взаимодействие, приводящее при затвердевании к образованию связи между кристаллитами. Могут наблюдаться три вида этой связи: растворением, химическим взаимодействием, образованием металлических связей [1].

Взаимодействие растворением следует избегать при пайке к тонким пленкам, это может вызвать растворение всей пленки в припое. С этой точки зрения для пайки предпочтительны не золотые контактные площадки, как в случае термокомпрессионных соединений, а медные. Золотая пленка толщиной до 50 нм полностью растворяется свинцово-кадмиевом припое [2]. Уменьшение опасности растворения достигается предварительным введением в припой присадки (2 – 3 %) того металла, из которого состоит плёнка [3].

Химическая связь возникает с образование переходного слоя в виде химического соединения припоя с металлом. Это наблюдается при пайке меди оловом, когда образуются прочные интерметаллические соединения  $Cu_6Sn_5$  и  $Cu_3Sn$ . Образование химической связи требует присутствия в припое легирующих присадок, способствующих образованию очень тонкого переходного слоя твердого раствора с металлом [4].

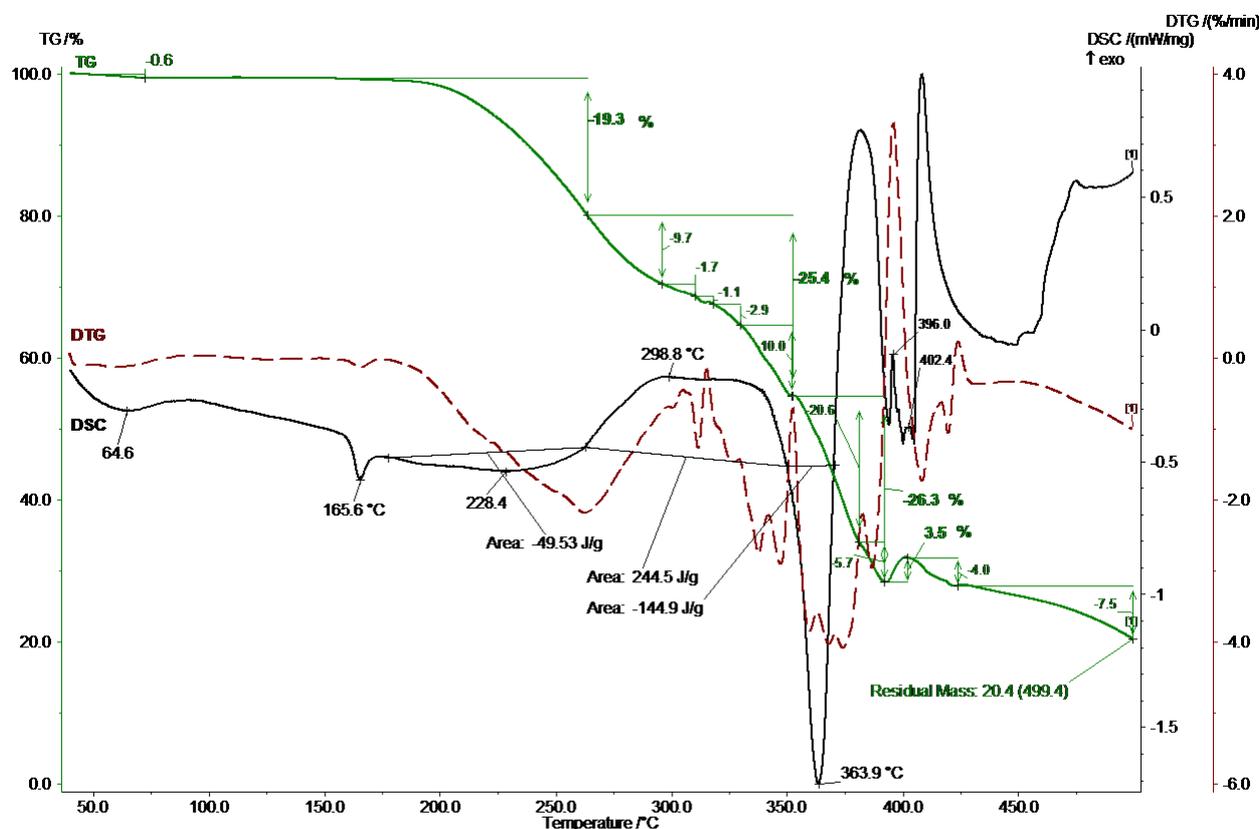
Для оценки химической активности флюса, дифталата бетулинола, исследовано его поведение при нагревании на воздухе в области температур, используемых при пайке изделий [5].

На рисунке приведена термограмма разложения дифталата бетулинола в окислительной атмосфере.

Термическая устойчивость данного вещества при нагревании на воздухе находится в тех же пределах (185<sup>0</sup>С), что и при нагревании в аргоне.

Процесс разложения дифталата бетулинола при нагревании на воздухе также как и в аргоне протекает в 2 стадии.

Первая стадия процесса термоокислительной деструкции дифталата бетулинола наступает после плавления вещества ( $T_{пл}=165,6^{\circ}\text{C}$ ), сопровождается потерей 19,3% исходной массы и описывается на кривой DSC широким плохо выраженным эндотермическим эффектом с  $\Delta H=49,53\text{ J/g}$ . Сопоставляя величины потери массы на этой стадии и строение моноэфирной группировки, можно предположить, что в окислительной атмосфере ее отщепление происходит по сложноэфирной связи. Молярная масса уходящей в этом случае группы ( $\text{C}_8\text{H}_5\text{O}_3$ ) составляет 149 г/моль и соответствует 20,2% масс., что хорошо коррелирует с экспериментальным значением убыли массы на этой стадии.



Кривые TG, DTG и DSC дифталата бетулинола при нагревании на воздухе

Окислительная атмосфера вносит ряд отличий в характер термоаналитических кривых. Так, если для инертной атмосферы характерен эндотермический характер всех происходящих процессов, то при нагревании на воздухе на кривой DSC присутствуют и экзотермические эффекты, что свидетельствует о протекании и окислительных процессов.

На второй стадии процесса термоокислительной деструкции дифталата бетулинола в области температур  $265\text{--}350^{\circ}\text{C}$  на кривой DSC наблюдается широкий экзотермический эффект при температуре максимума  $298,8^{\circ}\text{C}$  с  $\Delta H = -244,5\text{ J/g}$ . Процесс убыли массы на этой стадии также как и при нагревании в инертной атмосфере (рис. 3) носит ступенчатый характер и, по всей вероятности, также соответствует отщеплению боковых радикалов в структуре спирта, которые в воздушной атмосфере окисляются, что приводит к значительно большей убыли массы – 25,4%, по сравнению с термодеструкцией.

Третья стадия процесса термоокислительной деструкции, связанная, по видимости, с распадом циклической структуры бетулинола, характеризуется узким эндотермическим эффектом с максимумом при температуре  $363,9^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H=142,8\text{ J/g}$ . Следует отметить, что геометрия и энергетические характеристики этого эффекта существенно отличаются от наблюдаемого в этой области температур при нагреве в инертной атмосфере: температура его максимума –  $363,9^{\circ}\text{C}$  значительно ниже ( $401,3^{\circ}\text{C}$ ), поглощаемая энергия –  $142,8\text{ J/g}$  почти вдвое меньше ( $275,3\text{ J/g}$ ). Убыль массы на этом участке протекает в две ступени, составляя в сумме 26,3%, что также  $\approx$  в 2 р. меньше (54,3%). Все эти показатели свидетельствуют о ином механизме процесса разложения исходной структуры в окисли-

тельной атмосфере по сравнению с инертной. И дальнейший характер термоаналитических кривых это подтверждает: наблюдается серия экзотермических эффектов при 396,0 и 402,4<sup>0</sup>С, которые сопровождаются увеличением массы на 3,5%.

Таким образом, комплексным термическим анализом установлено, что процесс разложения флюса дифталата бетулинола в инертной атмосфере протекает в две стадии. Постадийное убывание массы флюса в интервале температур на воздухе составляет: 165-215<sup>0</sup>С – 19,3%, 215-355<sup>0</sup>С – 25,4%, 355-390<sup>0</sup>С – 26,3%.

#### Библиографические ссылки

1. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств. М : Техносфера, 2007. 256 с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 320 с.
3. Красов В. Г., Петраускас Г. Б., Чернозубов Ю. С. Толсто пленочная технология в СВЧ микроэлектронике. М: Радио и связь, 1985. 168 с.
4. Кантер А Вахрушев О. Качественная паяльная паста залог успешного производства // Технологии в электронной промышленности. 2009. №7. С.16-18.
5. Полежаева Н.И., Тарасова Л.С., Логачев Н.И., Вольф В.А., Ламберг Е.Р. Комплексный термический анализ флюса, дифталата бетулинола, для технологии поверхностного монтажа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 7. 2021. С.76 81. doi: 10.17513/mjpf.13253. Режим доступа: <https://applied-research.ru>.

#### Reference

1. Medvedev A.M. Assembly and installation of electronic devices. M : Technosfera, 2007. 256 p.
2. Parfenov O.D. Microchip technology. M.: Higher school, 1986. 320 p.
3. Krasov V. G., Petrauskas G. B., Chernozubov Yu. S. Thick-film technology in microwave microelectronics. M: Radio and communication, 1985. 168 p.
4. Kanter A Vakhrushev O. High-quality solder paste is the key to successful production // Technologies in the electronic industry. 2009. No. 7. pp.16-18.
5. Polezhaeva N.I., Tarasova L.S., Logachev N.I., Wolf V.A., Lamberg E.R. Comprehensive thermal analysis of flux, betulinol diphtalate, for surface mount technology // International Journal of Applied and Fundamental Research. No. 7. 2021. P.76 81. doi: 10.17513/mjpf.13253. Access mode: <https://applied-research.ru>.

© Полежаева Н. И., Вольф В. А., 2022

УДК 620.193.94:621.791.048

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ФЛЮСА, ДИФТАЛАТА БЕТУЛИНОЛА

Н. И. Полежаева, Е. Р. Ламберг

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Физико-химическое исследование флюса, дифталата бетулинола, в атмосфере аргона показало, что термическая деструкция протекает в две стадии в интервале температур 165 – 460<sup>0</sup>С, с потерей 96,5% исходной массы.*

*Ключевые слова: пайка, паяльная паста, флюс, дифталат бетулинола, термическая деструкция.*

## THERMAL DESTRUCTION OF FLUX, BETULINOL DIPHTHALATE

N. I. Polezhaeva, E. R. Lamberg

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Physical and chemical study of the flux, butulinol diphthalate, in an argon atmosphere showed that thermal degradation proceeds in two stages in the temperature range of 165-4600C, with a loss of 96.5% of the initial mass.*

*Keywords: soldering, solder paste, flux, betulinol diphthalate, thermal destruction.*

Соединение пайкой предполагает участие третьего металла в жидком состоянии, который смачивает соединяемые металлы и при затвердевании образует металлическую связь [1]. Пайка может быть горячая (расплавленными припоями) и холодная (с помощью амальгамы или галлия) [2]. Основным условием создания паяного соединения является взаимодействие жидкого припоя с поверхностью чистых соединяемых металлов [3]. Смачивание является неперенным условием образования паяного соединения [4]. Степень смачивания и растекания зависит от вида контактирующих металлов, состояния поверхности (наличие окислов, шероховатость), а также условий пайки (температура, газовая среда, продолжительность пайки). Флюсы, применяемые при пайке, не только растворяют окислы на поверхности твердого металла [5]. Являясь поверхностно-активными веществами, они уменьшают поверхностное натяжение припоев, способствуют улучшению смачивания и растекания, передача тепла на всю зону пайки [6].

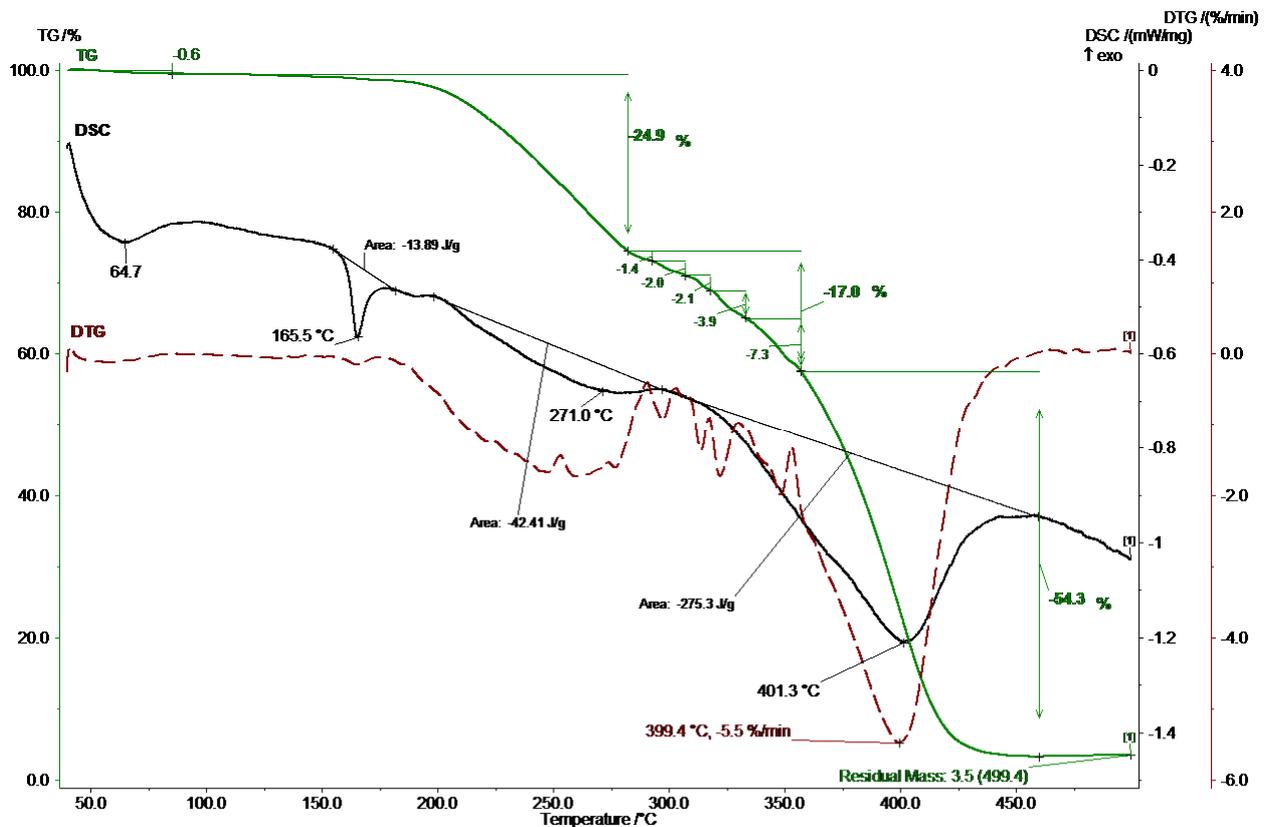
Для оценки химической активности флюса, дифталата бетулинола, исследовано его поведение при нагревании в инертной атмосфере в области температур, используемых при пайке изделий [7].

На рис. 1 приведена термограмма разложения дифталата бетулинола при нагревании его в инертной атмосфере (аргон). Данный образец термически устойчив до 185<sup>0</sup>С. Небольшая убыль массы (0,6%) в начале нагрева связана с процессом ухода адсорбционной влаги, которому соответствует широкий эндотермический эффект на кривой DSC с максимумом при температуре 64,7<sup>0</sup>С.

Плавление данного образца дифталата бетулинола происходит при температуре 165,5<sup>0</sup>С ( $\Delta H=13,89$  J/g). После чего наступает процесс его деструкции, протекающий в несколько стадий. Первая стадия термодеструкции дифталата бетулинола протекает в температурной области 185-290<sup>0</sup>С и описывается широким плохо выраженным эндотермическим эффектом ( $\Delta H= 42,41$  J/g).

Потеря массы на этом этап составила 24,9 % от исходной массы образца. Исходя из анализа структурной формулы дифталата бетулинола (см. рисунок), это может быть следствием отщепления моноэфирной группировки, связанной с циклической структурой спирта через метиленовую группу:

– CH<sub>2</sub> – O – CO – C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(COOH). Молярная масса этой группировки (C<sub>9</sub>H<sub>7</sub>O<sub>4</sub>) составляет 197 г/моль, что соответствует 24,25 % масс.



Кривые TG, DTG и DSC дифталата бетулинола при нагревании в атмосфере аргона

Вторая стадия процесса описывается значительным эндотермическим эффектом при температуре максимума 401,3<sup>0</sup>С ( $\Delta H=275,3$  J/g).

На второй стадии процесса разложения дифталата бетулинола можно выделить 2 участка. Первый – в области температур 290-360<sup>0</sup>С, который характеризуется ступенчатой потерей массы: 2,0; 2,1; 3,9 и 7,3 % (рис. 1, кривая TG) при температурах : 297,5; 314,0; 322,2 и 348,5<sup>0</sup>С, соответственно. Суммарная убыль массы на этом участке составила 16 %. Такой характер потери массы образца может быть связан с последовательным отщеплением боковых радикалов в молекуле бетулинола, расчетная масса этих элементов его структуры составляет 17% масс.

Второй участок относится к температурной области 360-460<sup>0</sup>С. Разложение при этом проходит более интенсивно – со скоростью 5,5%/мин., что значительно превышает среднюю скорость убыли массы на первом участке: 0,5 – 1,3 %/мин. В этой температурной области происходит убыль 54,3% исходной массы, что связано, вероятно, с распадом многоядерной циклической структуры бетулинола, молярная масса которого 443 г/моль, что составляет 60% масс. По окончании процесса нагрева к 500<sup>0</sup>С остаточная масса образца составила 3,5%, что свидетельствует о полном распаде структуры дифталата бетулинола.

Таким образом, комплексным термическим анализом установлено, что процесс разложения флюса дифталата бетулинола в инертной атмосфере протекает в две стадии, наблюдается убывание массы флюса в интервале температур: 165-285<sup>0</sup>С – 24,9%, 285 –355<sup>0</sup>С – 17,0%, 355 – 465<sup>0</sup>С – 54,3%, соответствующие рабочему диапазону оплавления паяльных паст.

#### Библиографические ссылки

1. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа. Рязань: Издательство Узорочье, 2001. 160 с.

2. Мэнгин Ч. Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 276 с.
3. Красов В.Г., Петраускас Г.Б., Чернозубов Ю.С. Толсто пленочная технология в СВЧ микроэлектронике. М: Радио и связь, 1985. 168 с.
4. Нижник М. Паяльные пасты: все о главном // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2008. № 5. С. 27-32.
5. Материалы для пайки и ремонта печатных плат // Группа компаний Остек. 2013. № 14. 92 с.
6. Полежаева Н.И. Адгезионная способность флюсов-связок для технологии поверхностного монтажа // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования». 2022. № 87. Ч. 2. С. 84–87. doi: 10.18411/trnio-07-2022-p2. Режим доступа URL: <https://ljournal.ru>.
7. Полежаева Н.И., Тарасова Л.С., Логачев Н.И., Вольф В.А., Ламберг Е.Р. Комплексный термический анализ флюса, дифталата бетулинола, для технологии поверхностного монтажа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 7. 2021. С.76–81. doi: 10.17513/mjpf.13253. Режим доступа: <https://applied-research.ru>.

#### Reference

1. Suskin V.V. Fundamentals of surface mount technology. Ryazan: Uzorochoye Publishing House, 2001. 160 p.
2. Mangin Ch. G., McClelland S. Surface mount technology: Per. from English. M.: Mir, 1990. 276 p.
3. Krasov V.G., Petrauskas G.B., Chernozubov Yu.S. Thick-film technology in microwave microelectronics. M: Radio and communication, 1985. 168 p.
4. Nizhnik M. Solder pastes: everything about the main thing // Production of electronics: technologies, equipment, materials. 2008. No. 5. S. 27-32.
5. Materials for soldering and repair of printed circuit boards // Ostek group of companies. 2013. No. 14. 92 p.
6. Polezhaeva N.I. Adhesion ability of flux binders for surface mount technology // Peer-reviewed scientific journal "Trends in the development of science and education". 2022. No. 87. Part 2. S. 84–87. doi: 10.18411/trnio-07-2022-p2. URL access mode: <https://ljournal.ru>.
7. Polezhaeva N.I., Tarasova L.S., Logachev N.I., Wolf V.A., Lamberg E.R. Comprehensive thermal analysis of flux, betulinol diphthalate, for surface mount technology // International Journal of Applied and Fundamental Research. No. 7. 2021. P.76–81. doi: 10.17513/mjpf.13253. Access mode: <https://applied-research.ru>.

© Полежаева Н. И., Ламберг Е. Р., 2022

УДК 621.791.048:666.364

**ФЛЮС, ДИФТАЛАТ БЕТУЛИНОЛА, ДЛЯ ПАЯЛЬНЫХ ПАСТ**

Н. И. Полежаева, Н. И. Логачев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
 E-mail: piv-80@mail.ru

*Термический анализ флюса, дифталата бетулинола, в атмосфере аргона показал, что он проявляет химическую активность в широком диапазоне температур, это позволяет использовать его в пастах с порошками припоев с температурой плавления 165 – 460<sup>0</sup>С.*

*Ключевые слова: флюс, дифталат бетулинола, термическая деструкция, паяльная паста.*

**FLUX, BETULINOL DIPHthalATE, FOR SOLDERING PASTES**

N. I. Polezhaeva, N. I. Logachev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: piv-80@mail.ru

*Thermal analysis of the flux, butulinol diphtalate, in an argon atmosphere showed that it exhibits chemical activity in a wide temperature range, which allows it to be used in pastes with solder powders with a melting point of 165 – 460<sup>0</sup>С.*

*Keywords: flux, betulinol diphtalate, thermal destruction, solder paste.*

Флюсы, применяемые при пайке должны удовлетворять следующим требованиям: 1) растворять очень тонкую окисную пленку; 2) защищать от окисления во время пайки; 3) смачивать поверхности основного металла и жидкого припоя и понижать поверхностное натяжение припоя это облегчает его растекание по площади паяного шва 4) выравнивать передачу тепла в зоне пайки; 5) остаток флюса и продукты его разложения должны переходить на поверхность припоя, как только припой образует сплав с основным металлом, и легко удаляться после пайки; 6) при разложении флюса не должно образовываться газов, разрушающих соседние поверхности [1-7].

В качестве флюса для паяльной пасты, предложен дифталат бетулинола (C<sub>46</sub>H<sub>58</sub>O<sub>8</sub>) [8].

Дифталат бетулинола – 3β,28-дифталатокси-луп-20(29)-ен формулы (I) является сложным эфиром фталевой кислоты и бетулинола (рис. 1).

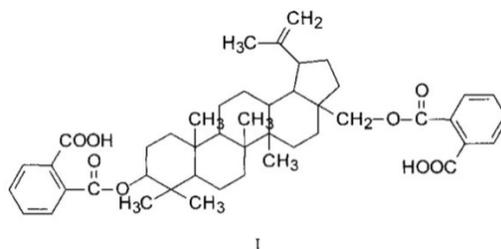


Рис. 1. Структурная формула дифталата бетулинола

Строение дифталата бетулинола подтверждено методом ИК-спектроскопии (рис. 2).

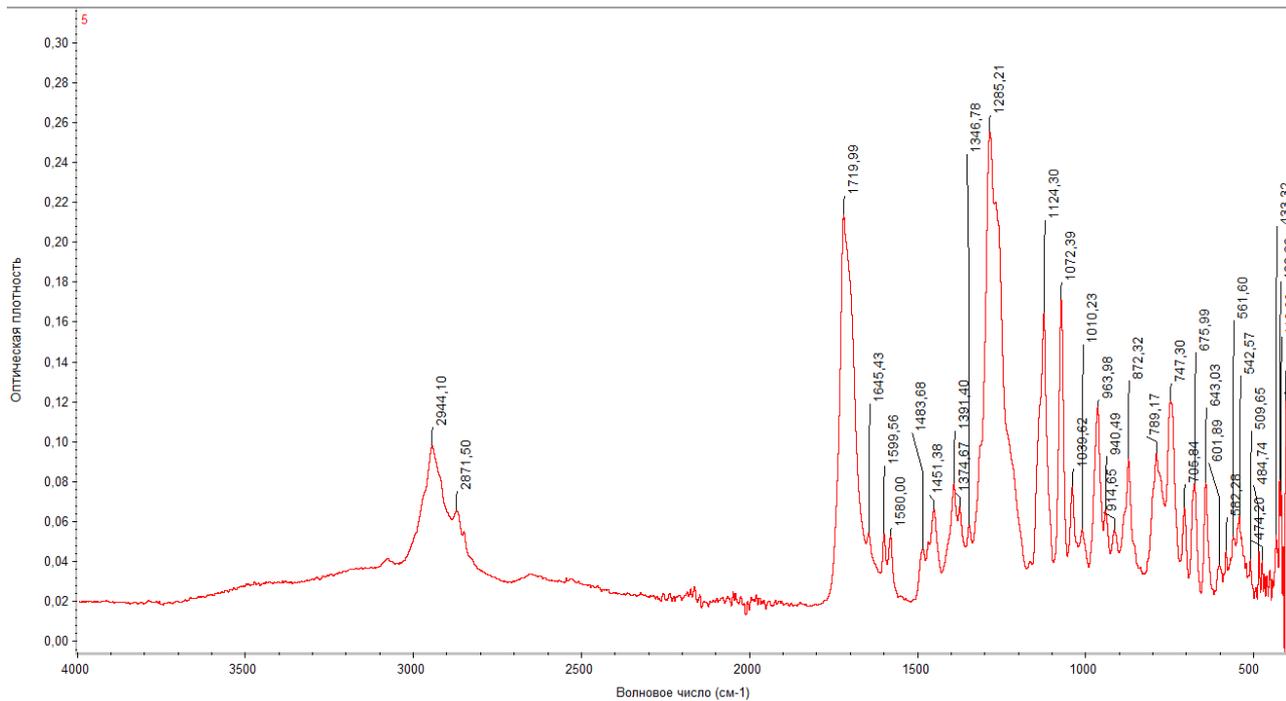


Рис. 2. ИК-спектр дифталата бетулинола

В ИК-спектре дифталата бетулинола характерными являются следующие полосы поглощения ( $\nu, \text{cm}^{-1}$ ): 2944,10; 2871,50 (C–H); 1719,99, 1645,43, 1599,56, 1580,00 (C=O); 1483,68; 1451,38; 1391,40; 1374,67; 1346,78 (C–C); 1285,21; 1124,30; 1072,39, 1039,62, 1010,23 (C–O–C). Отсутствие полос поглощения в ИК-спектрах дифталата бетулинола области 3400 – 3450  $\text{cm}^{-1}$  указывает на полное замещение гидроксильных групп в молекуле бетулинола на ацильные группы.

Как показали результаты термического анализа, дифталат бетулинола химически активен при температурах 165 – 460°C (рис. 3).

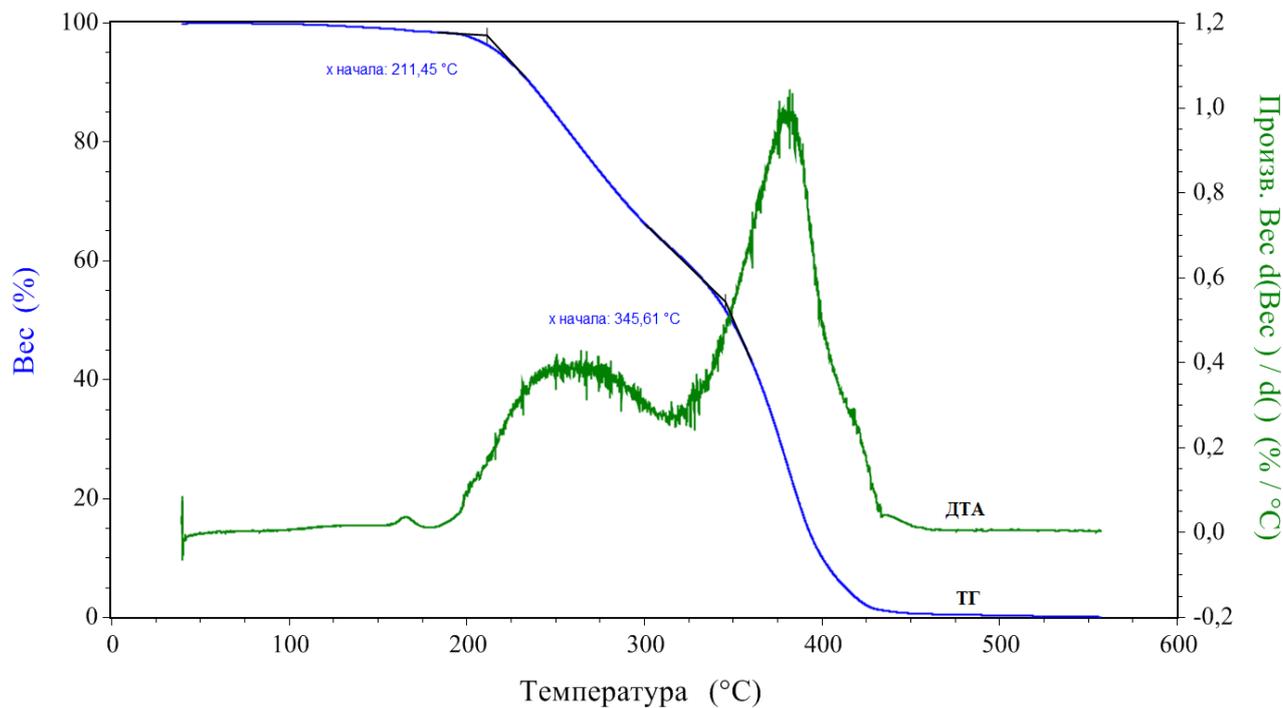


Рис. 3. Кривые ТГ и ДТА дифталата бетулинола при нагревании в атмосфере аргона

Термическое разложение флюса, дифталата бетулинола, в атмосфере аргона протекает в две стадии (рис. 3). Наблюдается убывание массы флюса в интервале температур: 165-285<sup>0</sup>С – 24,9%, 285 – 355<sup>0</sup>С – 17,0%, 355 – 465<sup>0</sup>С – 54,3% (рис. 3, кривая ТГ). Интенсивное разложение проходит в узком температурном диапазоне 380 – 400<sup>0</sup>С (рис. 3, кривая ДТА).

Таким образом, термическим анализом установлен достаточно широкий диапазон флюсующей активности дифталата бетулинола 165 – 465<sup>0</sup>С. Температурный диапазон термической деструкции дифталата бетулинола соответствует рабочему диапазону оплавления паст. Широкий диапазон химической активности дифталата бетулинола позволяет использовать его в трафаретной и припойной пастах с различной температурой оплавления.

#### Библиографические ссылки

1. Материалы для пайки и ремонта печатных плат // Группа компаний Остек. 2013. №14. 92 с.
2. Кантер А Вахрушев О. Качественная паяльная паста залог успешного производства // Технологии в электронной промышленности. 2009. №7. С.16-18.
3. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа. Рязань: Издательство Узорочье, 2001. 160 с.
4. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств. М : Техносфера, 2007. 256 с.
5. Парфенов О.Д. Технология микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 320 с.
6. Красов В. Г., Петраускас Г. Б., Чернозубов Ю. С. Толсто пленочная технология в СВЧ микроэлектронике. М: Радио и связь, 1985. 168 с.
7. Белоус А.И., Емельянов В.А. Основы технологии микромонтажа интегральных схем М.: ДМК Пресс, 2013. 316 с.
8. Левданский В.А., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н. Способ получения дифталата бетулинола // Патент РФ № 2614149. Патентообладатель ФГБУН «Институт химии и химической технологии СО РАН». 2017. Бюл. № 9.

#### Reference

1. Materials for soldering and repair of printed circuit boards // Ostek group of companies. 2013. No. 14. 92 p.
2. Kanter A Vakhrushev O. High-quality solder paste the key to successful production // Technologies in the electronic industry. 2009. No. 7. pp.16-18.
3. Suskin V.V. Fundamentals of surface mount technology. Ryazan: Uzorochoye Publishing House, 2001. 160 p.
4. Medvedev A.M. Assembly and installation of electronic devices. M : Technosfera, 2007. 256 p.
5. Parfenov O.D. Microchip technology. M.: Higher school, 1986. 320 p.
6. Krasov V. G., Petrauskas G. B., Chernozubov Yu. S. Thick-film technology in microwave microelectronics. M: Radio and communication, 1985. 168 p.
7. Belous A.I., Emelyanov V.A. Fundamentals of integrated circuit microwiring technology. Moscow: DMK Press, 2013. 316 p.
8. Levdansky V.A., Levdansky A.V., Kuznetsov B.N. Method for obtaining betulinol diphthalate // Patent of the Russian Federation No. 2614149. Patentee of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2017. Bull. No. 9.

© Полежаева Н. И., Логачев Н. И., 2022

УДК 547.775

**ПОЛУЧЕНИЕ 1,4-БИС((3,5-ДИМЕТИЛ-4-НИТРОЗО-1Н-ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)МЕТИЛ)БЕНЗОЛА**

Т. В. Полиенко\*, К. Ю. Кучина, А. С. Косицына

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

*В работе показан синтез–1-(4-(бромметил)бензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола и 1,4-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензола в двух типах условий. Строение синтезированных соединений подтверждено ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопией.*

*Ключевые слова: 4-нитрозопиразол, алкилирование, α, α'-дибром-п-ксилол, суперосновная среда.*

**PREPARATION  
 OF 1,4-BIS((3,5-DIMETHYL-4-NITROSO-1H-PYRAZOLE-1-YL)METHYL)BENZENE**

Т. V. Polienko\*, K. Yu. Kuchina, A. S. Kositsyna

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 \*E-mail: polienkot27@mail.ru

*This article describes the synthesis of 1-(4-(bromomethyl)benzyl)-3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole and 1,4-bis((3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole-1-yl)methyl)benzene under two types of conditions. We have proven the structure of the synthesized compounds by <sup>1</sup>H NMR spectroscopy.*

*Keywords: 4-nitrosopyrazole, alkylation, α, α'-dibromo-p-xylene, superbasic system.*

В настоящее время синтез производных 4-нитрозопиразола нашел широкое применение в полимерной промышленности. Это объясняется тем, что полученные вещества используются в качестве низкотемпературных вулканизирующих агентов.

Ранее была показана возможность прямого N-алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола [1]. Применение в качестве алкилирующих агентов дигалогенпроизводных открывает возможность получения бис-4-нитрозопиразолов и соответствующих 1-галогеналкил-3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразолов [2].

На кафедре ОХТ СибГУ им. М.Ф. Решетнева были получены соединения с линкерами, содержащими три и четыре метиленовые группы [3]. Для расширения ряда ранее неизвестных перспективных продуктов представляло интерес получить динитрозопиразолы с ароматическим фрагментом в линкере. Поэтому целью работы является получение 1,4-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензола в исследованных ранее условиях в источнике [4].

Для этого бромированием п-ксилола был получен α, α'-дибром-п-ксилол [5], который вводили в реакцию алкилирования в суперосновной среде и в ацетоне (рис. 1). В результате синтеза в обоих случаях были выделены 1,4-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензол и в качестве дополнительного продукта 1-(4-(бромметил)бензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол.

*Алкилирование натриевой соли 3,5-диметил-4-нитрозопиразола α, α'-дибром-п-ксилолом в ацетоне* (см. рисунок). 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) α, α'-дибром-п-ксилола. Реакционную массу кипятили на водяной бане в течение 3,5 часов. Через 10 минут после начала реакции раствор изменил цвет с красного на зелёный. Контроль реакции осуществляли методом ТСХ (гексан:этилацетат 1:1). По истечении указанного времени реакционную массу упаривали. Продукты выделяли методом колоночной хромато-

графии (силикагель, гексан-этилацетат: моно-: 50:15, бис-:50:30). Выход бис-4-нитрозо-1Н-пиразола: 0,108 г (38%), продукт моноалкилирования – 0,03 г (12%).

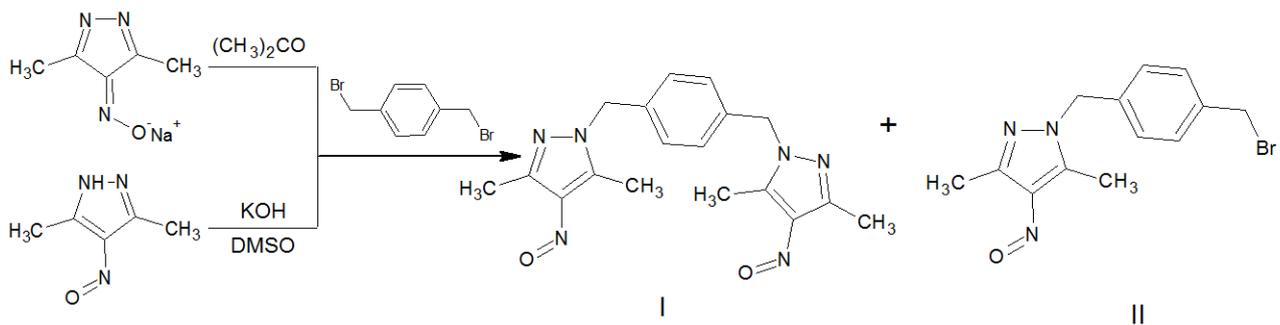


Схема алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозопиразола  $\alpha, \alpha'$ -дибром-*p*-ксилолом

*Алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозопиразола  $\alpha, \alpha'$ -дибром-*p*-ксилолом в суперосновной среде* (см. рисунок). 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-*p*-ксилола. Через 1 час после добавления алкилирующего агента синий раствор приобрёл зелёный цвет. Контроль реакции осуществляли методом ТСХ (гексан-этилацетат 1:1). Через 5 часов реакционную массу разбавляли 650 мл воды и экстрагировали хлороформом (10–15 мл  $\times$  9). Экстракты объединяли и отгоняли  $\text{CHCl}_3$  на ротационном испарителе. Разделение продуктов проводили на хроматографической колонке с силикагелем. В качестве элюента использовали смесь гексана и этилацетата (моно-:50:5, бис-:50:30). Выход бис-4-нитрозо-1Н-пиразола: 0,172 г (61%), продукт моноалкилирования – 0,007 г (3%).

*1,4-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол-1-ил)метил)бензол*: синие кристаллы;  $T_{\text{пл}} = 154\text{--}156^\circ\text{C}$ . ЯМР  $^1\text{H}$  ( $\text{CDCl}_3$ ),  $\delta$ , м.д.: 7,26–7,25 (м, 4Н, Аг), 5,27 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2,82 (уш. с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2,40 (уш. с, 3Н,  $\text{CH}_3$ ).

*1-(4-(бромметил)бензил)-3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразол*: голубые кристаллы; ЯМР  $^1\text{H}$  ( $\text{CDCl}_3$ ),  $\delta$ , м.д.: 7,40–7,19 (м, 4Н, Аг), 5,27 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 4,47 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2,40 (уш. с, 3Н,  $\text{CH}_3$ ).

Таким образом, было проведено алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозопиразола  $\alpha, \alpha'$ -дибром-*p*-ксилолом в двух типах условий, получены два ранее неизвестных соединения, строение которых подтверждено с помощью ЯМР  $^1\text{H}$  спектроскопии. В приведённых спектрах отсутствует сигнал водорода NH- группы исходного 3,5-диметил-4-нитрозопиразола, что свидетельствует о прохождении реакции алкилирования.

### Библиографические ссылки

1. Изучение алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола 1-бромбутаном / А.В. Боброва, А.Д. Раджабов, Е.В. Роот, Г.А. Субоч // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник статей студентов и молодых ученых. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020, 437–438 с.

2. N-алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозопиразола / 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. Изучение алкилирования 3,5-диметил-4-нитрозо-1Н-пиразола 1-бромбутаном / А.В. Боброва, А.Д. Раджабов, Е.В. Роот, Г. А. Субоч // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки.

Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник статей студентов и молодых ученых. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020, 437-438 с.

5. Хиккинботтом В., Реакции органических соединений. ГОНТИ, 1939, 72 с.

### References

1. Study of alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with 1-bromobutane / A.V. Bobrova, A.D. Radzhabov, E.V. Root, G.A. Suboch // 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, 2020, 437-438 p.

2. N-alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitrosopyrozol / 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. Study of alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with 1-bromobutane / A.V. Bobrova, A. D. Radzhabov, E.V. Root, G. A. Suboch // 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, 2020, 437-438 p.

5. Hickinbottom V., Reactions of organic compounds. GONTI, 1939, 72 p.

© Полиенко Т. В., Кучина К. Ю., Косицына А. С., 2022

**ВЛИЯНИЕ ВУЛКАНИЗУЮЩЕЙ ГРУППЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА  
ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГОКРАТНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ  
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

А. С. Пушница<sup>1\*</sup>, В. В. Власов<sup>2</sup>, А. Н. Черепанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет  
Российская Федерация, 119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Ярославский государственный технический университет  
Российская Федерация, 150064, г. Ярославль, Московский просп., 88

\*E-mail: apushnitsa@inbox.ru

*Исследование долговечности при низких температурах эластомерных материалов на основе бутадиен-нитрильных каучуков с различными вулканизирующими агентами.*

*Ключевые слова: резиновая смесь, вулканизирующая группа, циклические деформации, низкотемпературные испытания.*

**EFFECTS OF THE VULCANIZING GROUP ON THE STRENGTH PROPERTIES  
OF ELASTOMERIC MATERIALS UNDER REPEATED DEFORMATION  
AT LOW TEMPERATURES**

A. S. Pushnitsa<sup>1\*</sup>, V. V. Vlasov<sup>2</sup>, A. N. Cherepanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University  
78, Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russian Federation

<sup>2</sup> Yaroslavl State Technical University  
88, Moskovsky prospect, Yaroslavl, 150064, Russian Federation

\* E-mail: Vlasovvv@ystu.ru

*Investigation of durability at low temperatures of elastomeric materials containing butadiene-nitrile rubbers with different vulcanizing agents.*

*Keywords: rubber compound, vulcanizing agent, cyclic deformations, low temperatures testing.*

Для эластомерных материалов, эксплуатируемых в условиях низких температур одним из важных факторов, является долговечность при циклических деформациях. Особенно, если изделие является уплотнителем, патрубком или элементом системы, имеющим непосредственный контакт с маслами и топливом. По большей части, такие изделия изготавливаются из резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков, имеющих широкое применение, ввиду их стойкости к углеводородам, низким температурам, доступностью на рынке.

Как правило, усталостная выносливость резин при обычных температурах эксплуатации зависит от прочности, т. е. чем большей прочностью обладает материал, тем более высокую усталостную выносливость он имеет [1]. Однако, в условиях низких температур существенно изменяется упруго-гистерезисные и пласто-эластические характеристики материала, связанные с существенным снижением подвижности макромолекул полимера.

Изменяя состав резиновой смеси, можно, в определенной степени замедлить или ограничить эти процессы, получая материалы с новыми ценными эксплуатационными характеристиками. Поэтому, изучение влияния состава и низких температур на изменение прочностных свойств материалов, представляет научный и практический интерес.

В работе проводилось исследование влияния вулканизирующей группы на прочностные свойства эластомеров при многократных деформациях в условиях низких температур. В качестве полимерной

матрицы был выбран каучук марки БНКС-40 АМН, активным наполнителем выступил ТУ П324. Различие вулканизирующих групп состояло в том, что одна из них была пероксидная (Luregox F40), а другая серная (Сера молотая). Изготовление резиновых смесей проводилось на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160. На следующем этапе определялись вулканизационные характеристики на реометре MonTech MDR-3000. Опытные вулканизаты получены методом компрессионного формования в прессе при оптимальных временах вулканизации.

Как показано в ранее проведенных исследованиях [2] образцы, полученные с применением серной вулканизирующей группой, показали прочность при разрыве 19,2 МПа, в то время как образцы, изготовленные с применением пероксидной вулканизирующей группой, показали значение в 16,6 МПа.

Температурный предел хрупкости для образцов с серной и пероксидной вулканизирующей группой составил  $-50^{\circ}\text{C}$  и  $-51^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Согласно опубликованным исследованиям [3], при пероксидной вулканизации образуются жесткие углерод-углеродные связи. Совместное использование серы и органического пероксида устраняет потерю органического пероксида за счёт термического разложения, обеспечивая лучшую сшивку эластомеров [4].

При оценке усталостно-прочностных свойств для эластомерных материалов с близкими упруго-вязкими свойствами испытания можно проводить при одинаковых значениях напряжения или одинаковой деформации [1].

Испытания на усталостную выносливость при многократном растяжении эластомерных образцов проводили в условиях циклического нагружения при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$ , деформации 50 % и частоте 3 Гц на MonTech FT 3000 C-H Fatigue Tester. Вид образцов после испытаний представлен на рисунке.



Образцы после циклических испытаний

Все результаты, полученные в процессе испытания, фиксируются программным обеспечением и выводятся на экран монитора компьютера. Образцы, вулканизированные пероксидом, выдержали в среднем 59,2 тыс. циклов деформации до разрушения по сравнению с образцами, вулканизированными серой для которых среднее значение циклов ( $N_{cp}$ ) составило 8,9 тыс. Содержание наполнителя для двух полимерных композиций с различными вулканизирующими группами было равным, также отсутствовали какие-либо добавки способные повысить морозостойкость и выносливую усталость вулканизатов.

В результате исследования, можно сделать вывод о том, что тип вулканизационной сетки образующийся при введении пероксида Luregox F40 в эластомерную композицию на основе бутадиен-нитрильных каучуков с повышенным содержанием НАК позволяет повысить долговечность материала при многократных деформациях в условиях низких температур, в отличие от аналогичных эластомерных материалов, содержащих серу в качестве вулканизирующей группы, не смотря на то, что физико-механические показатели таких материалов выше при нормальных условиях.

### Библиографические ссылки

1. Ж. С. Шашок, А. В. Касперович Технология эластомеров // Лабораторный практикум. 2006. Часть 2. С. 20-22.
2. А.С. Пушница, В.В. Власов, А.В. Горшкова Исследование влияния полукристаллического сополимера этилена и пропилена на свойства эластомеров на основе полярных каучуков // Доклады XXVII научно-практической конференции Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии. 2022. С. 170-173
3. Сандалов С. И. Разработка термоагрессивостойких резин на основе комбинаций бутадиен-нитрильных каучуков для уплотнительных элементов пакеров: дис. Чебоксары: Дис. канд. техн. наук, 2014 С. 32.
4. Семенова С. Н., Сулейманов Р. Р., Чайкун А. М. Совместное использование этиленпропилендиенового и метилфенилсилоксанового каучуков в рецептуре морозостойкой и озоностойкой резины //Труды ВИАМ. 2019. №. 9 (81). С. 64-72.

### References

1. J. S. Shashok, A. V. Kasperovich Technology of elastomers // Laboratory practical work. 2006. Part 2. p. 20-22.
2. A.S. Pushnitsa, V.V. Vlasov, A.V. Gorshkova Investigation of the effect of semi-crystalline copolymer of ethylene and propylene on the properties of elastomers based on polar rubbers // Reports of the XXVII scientific-practical conference Rubber Industry. Raw materials. Materials. Technologies. 2022. p. 170-173
3. Sandalov S. I. Development of thermoaggression-resistant rubbers based on butadiene-nitrile rubber combinations for sealing elements of packers: Ph. Cheboksary: Ph.D. in Technical Sciences, 2014 p. 32.
4. Semenova S. N., Suleimanov R. R., Chaikun A. M. Joint use of ethylene propylene diene and methylphenylsiloxane rubbers in the formulation of frost-resistant and ozone-resistant rubber // Proceedings of VIAM. 2019. №. 9 (81). p. 64-72.

© Пушница А. С., Власов В. В., Черепанов А. Н., 2022

УДК 547.572.3

## СИНТЕЗ МЕДНОГО ХЕЛАТА ПИРИДИЛСОДЕРЖАЩЕГО 1,3 ДИКЕТОНА

А. С. Романченко\*, А. А. Кукушкин

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

*Показана возможность комплексообразования 1-фенил-3-(пиридин-4-ил)-1,3-пропандиола с ацетатом меди (II) и доказано содержание меди в полученном соединении с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии.*

*Ключевые слова: комплексообразование, бензопиридин, дикетон, медь, осадок.*

## SYNTHESIS OF COPPER CHELATE OF PYRIDYL-CONTAINING 1,3 DIKETONE

A. S. Romanchenko\*, A. A. Kukushkin

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

*The possibility of complexation of 1-phenyl-3-(pyridine-4-yl)-1,3-propanediol with copper (II) acetate is shown and the copper content in the resulting compound is proved by atomic emission spectroscopy and mass spectrometry.*

*Keywords: complexing, benzopyridine, diketone, copper, sediment.*

В настоящее время по-прежнему остается актуальной задачей синтез дикетонатов металлов, так как они представляют собой один из наиболее интересных классов внутрикомплексных соединений. Устойчивый интерес к изучению координационных и металлоорганических соединений обусловлен возможностью их использования в аналитике, микроэлектронике, катализе, экстракции, газовой хроматографии и других областях [1].

Ацетилацетон характеризуется высокой степенью «универсальности». Уже известны производные целого ряда элементов, весьма сильно различающихся по способности к комплексообразованию [2,3]. Своеобразие свойств этих соединений побудило нас подробнее заняться изучением влияния заместителя на способность к комплексообразованию.

В колбу объемом 250 мл, снабженной магнитной мешалкой, загружали растворенный в этиловом спирте 1-фенил-3-(пиридин-4-ил)-1,3-пропандион. При перемешивании по каплям добавляли спиртовой раствор ацетата меди (II) в соотношении 2:1. Смесь слегка подогрели и вели перемешивание в течение часа. Постепенно коричневый цвет раствора переходит в темно-зеленый с выпадением осадка. По окончании реакции образовавшийся темно-зеленый осадок отфильтровали.

Ход реакции контролировали методом тонкослойной хроматографии в элюенте гексан-этилацетат в соотношении 5:1. Идентификацию полученного соединения проводили с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии и индуктивно связанной плазмой [4].

С помощью атомно-эмиссионной спектроскопии было доказано содержание меди в полученном соединении.

Содержание меди в полученном комплексе бензопиридина и составило 31,3%. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что в реакцию вступают одна молекула дикетона и одна молекула ацетата меди (II), образуя предполагаемый комплекс (см. рисунок).

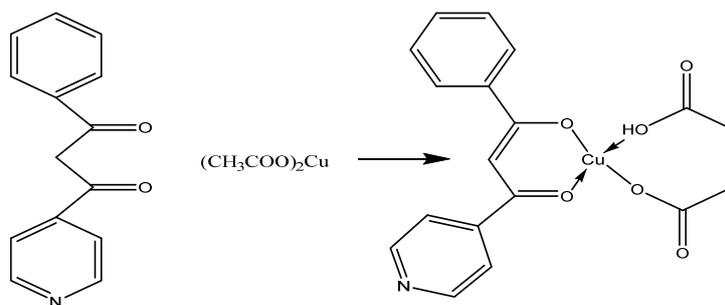


Рис.1. Синтез 1-фенил-3-(пиридин-4-ил)-1,3-пропандиола с ацетатом меди (II)

В масс-спектре ацетонатного комплекса дикетона имеется пик 343  $m/z$ , соответствующий рассчитанному. Так же в масс-спектре полученного хелатного комплекса присутствуют ионы  $C_{14}H_{11}O_2N^+$  225  $m/z$  и  $Cu$  63  $m/z$ , соответствующие полученному продукту и меди [5].

### Библиографические ссылки

1. Неудачина Л. К., Лакиза Н. В. Физико-химические основы применения координационных соединений : учеб. пособие / Екатеринбург : Уральский университет. 2014. 124 с.
2. Химия гетероциклических соединений. / Простаков Н. С., Исмаилов А. Я., Зволинский В. П., Фесенко Д. А. // 1973. №2. С.230-234.
3. Органическая химия. / А. И. Артеменко. М.: Высшая школа, 2022. 560 с.
4. Структура и Свойства Функциональных Производных Углеводородов / Сырбу. Москва: Гостехиздат. 2019. 727 с.
5. Масс-спектры положительных и отрицательных ионов линейных метил фенилсилоксанов. / Бочкарев В. Н., Поливанов А. Н., Фалько В. С. // Журнал общей химии. 1978. Т. 48. С. 858–861.

### References

1. Neuchadina L. K., Lakiza N. V. Physico-chemical bases of application of coordination compounds: textbook. manual / Yekaterinburg : Ural University. 2014. 124 p.
2. Chemistry of heterocyclic compounds. / Prostakov N. S., Ismailov A. Ya., Zvolinsky V. P., Fesenko D. A. // 1973. No.2. pp.230-234.
3. Organic chemistry. / A. I. Artemenko. M.: Higher School, 2022. 560 p.
4. Structure and Properties of Functional Derivatives of Hydrocarbons / Syrbu. Moscow: Gostekhizdat. 2019. 727 с.
5. Mass spectra of positive and negative ions of linear methyl phenylsiloxanes. / Bochkarev V. N., Polivanov A. N., Falko V. S. // Journal of General Chemistry. 1978. Vol. 48. pp. 858-861.

© Романченко А. С., Кукушкин А. А., 2022

УДК 547.772.1

**ИЗУЧЕНИЕ КИСЛОТНЫХ СВОЙСТВ 3(5)-(НАФТАЛИН-2-ИЛ)-4-НИТРОЗО-5(3)-  
(ТРИФТОРМЕТИЛ)-1Н-ПИРАЗОЛА**

А. С. Романченко<sup>1\*</sup>, Д. С. Волкова<sup>2</sup>, А. А. Кукушкин<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>Институт химии и химической технологии СО РАН, ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/24

\*E-mail: romanchenkoany@mail.ru

*Спектрофотометрическим методом определена константа кислотности 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола.*

*Ключевые слова: кислотные свойства, пиразол, константа кислотности, спектрофотометрия, аналитическая длина волны.*

**STUDY OF ACIDIC PROPERTIES OF 3(5)-(NAPHTHALENE-2-YL)-4-NITROSO-5(3)-  
(TRIFLUOROMETHYL)-1H-PYRAZOLE**

A. S. Romanchenko<sup>1\*</sup>, D. S. Volkova<sup>2</sup>, A. A. Kukushkin<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>Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, FITC "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS"  
50/24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

\*E-mail: romanchenkoany@mail.ru

*The acidity constant of 3(5)-(naphthalene-2-yl)-4-nitroso-5(3)-(trifluoromethyl)-1H-pyrazole was determined by the spectrophotometric method.*

*Keywords: acid properties, pyrazole, acidity constant, spectrophotometry, analytical wavelength.*

Пиразольная основа является удобным исходным материалом для получения мультифункциональных соединений. Она позволяет проводить широкий спектр химических реакций, таких как алкилирование, рибозилирование, алкокси- и гидроксиметилирование, нитрозирование, азосочетание, восстановление, кросс-сочетание [1]. Наличие электроакцепторных фторсодержащих групп в структуре лигандов и соответствующих комплексов обуславливает появление у этих соединений уникальных свойств, не характерных для нефторированных структур. Таким образом, фторсодержащие пиразолы и их производные являются перспективным объектом для исследования [2].

Одним из наиболее важных физико-химических параметров органического соединения является кислотность. Величина константы кислотности определяет максимально эффективные условия последующего эксперимента и возможность применения вещества в различных областях промышленности [3].

Поэтому целью нашей работы является определение константы кислотности 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола.

Для определения константы кислотности 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола проводили измерение оптической плотности. Для этого готовили спиртовые растворы с концентрацией  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/л, используя метод двойного разбавления. Для определения рКа применяли метод спектрофотометрии.

Выбор аналитической длины волны основывался на максимальном различии в значениях оптической плотности в кислотных и щелочных средах при максимуме поглощения анионом. Определение проводили при температуре  $25 \pm 0$  °С [4].

После этого готовили серию цитратных буферных растворов, в которых проводили определение рКа. Для получения этого значения строили график зависимости  $\lg I$  от рН. Константу кислотности определяли как точку пересечения полученной линейной функции с осью абсцисс, т.е. графическим способом [5].

Согласно графическим и аналитическим методам, рКа для 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола составил  $5,87 \pm 0,06$  (рис. 1, табл. 1).

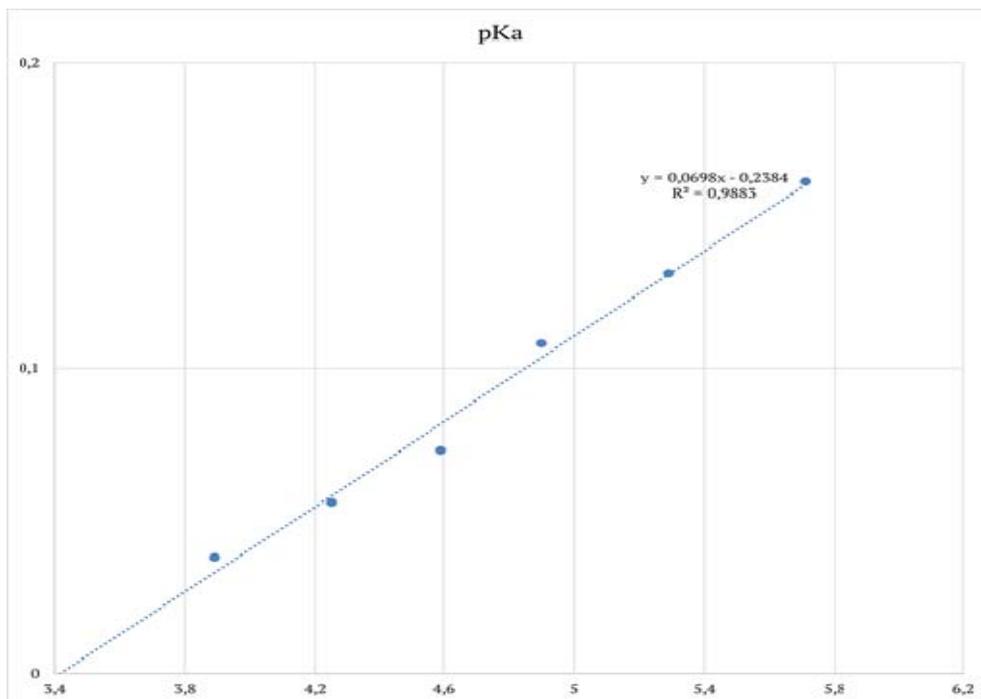


График зависимости  $\lg I$  (ионизационного отношения) от рН для 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола

Расчетная таблица константы кислотности для 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола

№	pH	$D_i$	$D_{щ}-D_i$	$D_i-D_k$	$I=(D_{щ}-D_i)/(D_i-D_k)$	$\lg I$	$pKa=pH-\lg I$	$Ka_i=10^{-pKa}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	3,89	0,227	0,038	0,473	12,44736842	1,095077544	2,794922456	0,001603532	
2	4,25	0,245	0,056	0,455	8,125	0,90982337	3,34017663	0,000456902	
3	4,59	0,262	0,073	0,438	6	0,77815125	3,81184875	0,000154224	
4	4,9	0,297	0,108	0,403	3,731481481	0,571881291	4,328118709	4,69766E-05	
5	5,29	0,32	0,131	0,38	2,900763359	0,462512301	4,827487699	1,48769E-05	
6	5,71	0,35	0,161	0,35	2,173913043	0,337242168	5,372757832	4,23879E-06	
		$D_{щ}=0,700$	$D_k=0,187$				$pKa_{cp}=3,74$		$\Delta pKa=0,04$

Таким образом, нами была определена константы кислотности 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1Н-пиразола спектрофотометрическим методом.

### Библиографические ссылки

1. Фторсодержащие пиразолы привилегированные скаффолды в медицинской химии / Бургарт Я. В., Щегольков Е. В., Агафонова Н. А. и др. // Молекулярные и биологические аспекты химии, фармацевтики и фармакологии: сборник тезисов докладов пятой Междисциплинарной конференции, Судак, 15–18 сентября 2019 года. Судак: Издательство "Перо", 2019. С. 15.
2. Химия фторзамещенных  $\beta$ - дикетонов и их производных / Исакова В. Г., Хлебникова Т. С., Лахвич Ф. А. // Успехи химии. 2010. С. 929-960.
3. Альберт А., Сергент Е. Константы ионизации кислот и оснований. М. : Химия, 1964. 180 с.
4. Теория химико-технологических процессов органического синтеза. Определение констант ионизации органических соединений и констант скорости химических реакций / Косицына А. С., Краснов П. О., Кукушкин А. А., Товбис М. С. Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2018. С. 80.
5. Швабе К. Основы техники измерения pH. М.: Издатинлит, 1962. 472 с.

### References

1. Fluorinated pyrazoles privileged scaffolds in medical chemistry / Burgart Ya. V., Shchegolkov E. V., Agafonova N. A. et al. // Molecular and biological aspects of chemistry, pharmacy and pharmacology: collection of abstracts of the fifth Interdisciplinary Conference, Sudak, September 15-18, 2019. Sudak: Publishing House "Pero", 2019. p. 15.
2. Chemistry of fluoro-substituted  $\beta$ -diketones and their derivatives / Isakova V. G., Khlebnikova T. S., Lakhvich F. A. // Uspekhi khimii. 2010. pp. 929-960.
3. Albert A., Sergeant E. Ionization constants of acids and bases. M. : Chemistry, 1964. 180
4. Theory of chemical and technological processes of organic synthesis. Determination of ionization constants of organic compounds and rate constants of chemical reactions / Kositsyna A. S., Krasnov P. O., Kukushkin A. A., Tovbis M. S. Krasnoyarsk: SibGU named after Academician M. F. Reshetnev, 2018. p. 80.
5. Shvabe K. Fundamentals of pH measurement technique. M.: Izdatinlit, 1962. 472 p.

© Романченко А. С., Волкова Д. С., Кукушкин А. А., 2022

УДК 678.7-1

## ДИНАМИКА МАССОПЕРЕНОСА ОСТАТОЧНЫХ МОНОМЕРОВ ИЗ ОБЪЕМА ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА В ВОДНО-СПИРТОВЫЙ РАСТВОР

Ю. В. Чижов<sup>2</sup>, В. Р. Пен<sup>1\*</sup>, С. И. Левченко<sup>1</sup>, Л. Е. Маскадынов<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 государственный медицинский университет  
имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого  
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, зд. 1

\*E-mail: 2507@inbox.ru

*Изучена динамика массопередачи остаточных мономеров после формирования полимерного изделия из его объема в водно-спиртовые растворы различной концентрации.*

*Ключевые слова: стоматологические пластмассы, остаточные мономеры, динамика экстракции.*

## DYNAMICS OF MASS TRANSFER OF RESIDUAL MONOMERS FROM THE POLYMER VOLUME TO AN AQUEOUS ALCOHOL SOLUTION

Y. V. Chijov<sup>2</sup>, V. R. Pen<sup>1\*</sup>, S. I. Levchenko<sup>1</sup>, L. E. Mascadynov<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>Voyno-Yasenetsky's Krasnoyarsk State Medical University  
1, Partizana Zheleznyaka street, Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

\*E-mail: 2507@inbox.ru

*The dynamics of mass transfer of residual monomers after forming a polymer product from its volume into aqueous-alcohol solutions of various concentrations has been studied.*

*Keywords: dental plastics, residual monomers, extraction dynamics.*

Акриловые мономеры, всегда присутствующие в готовом стоматологическом изделии из полиметилметакрилата, могут оказывать на человека вредное воздействие. Так, метилметакрилат, часто используемый в качестве исходного мономера в зубопротезировании, представляет собой весьма опасный токсикант. Предельно допустимые концентрации его в воде составляют 0,01 мг/л [1], в водных вытяжках из используемых в медицине пластмасс – 0,25 мг/л [2]. Диффузия мономеров из зубных протезов в полость рта может вызывать различные аллергические заболевания, его длительное воздействие может приводить к поражению печени и почек [3, 4]. Поэтому актуален поиск эффективных способов обработки изделий из стоматологических пластмасс, позволяющих уменьшить количество свободных мономеров, попадающих в полость рта.

В настоящее время содержание остаточного мономера в полимерных зубопротезных конструкциях является одним из основных критериев качества материала. Однако, такой показатель ничего не говорит о динамике и количестве свободного акрилата попадающего из изделия в полость рта.

Для оценки последней в настоящей работе рассматривались следующие полимерные композиции:

Образец № 1 – Вертекс;

Образец № 2 – Протакрил;

Образец № 3 – Бесцветная пластмасса;

Образец № 4 – Этакрил;

Образец № 5 – Фторекс.

Были изготовлены образцы пластмасс в виде параллелепипедов со сторонами 1 см и длиной 8 см, вес  $8 \pm 0.5$  г. Образцы готовились в соответствии с инструкцией изготовления базисов съемных зуб-

ных протезов и поэтому идентичны им по составу и технологическим условиям. Образцы помещались в дистиллированную воду объемом 42 мл. Эксперимент проходил в течение 5 суток при 37 °С. Замеры концентрации растворенных мономеров проводили спектрофотометрически 1 раз в сутки, отбирали 1 мл пробы на измерение. После измерения пробы возвращали, для сохранения исходного объема [5, 6]. Все измерения проводили не менее, чем в трех повторениях ( $n=3$ ,  $P=0,95$ ). Результаты представлены на рис. 1 и 2.

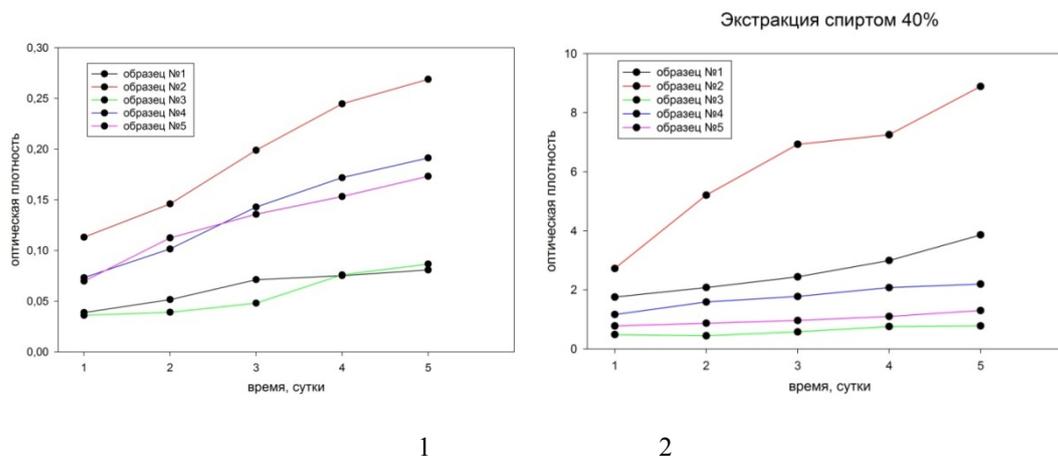


Рис. 1. Динамика водной (1) и водно-спиртовой (2) экстракции различных полимерных композиций

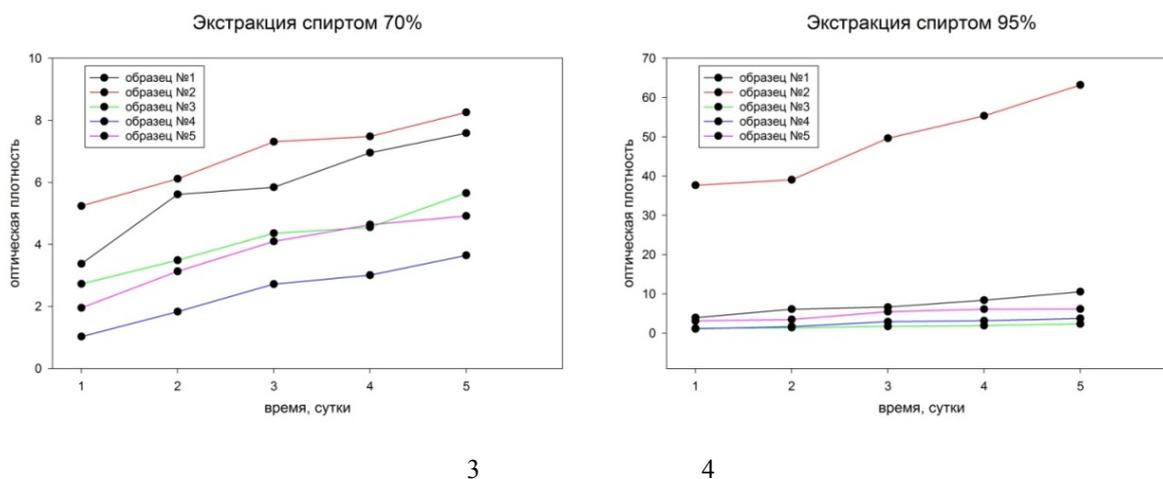


Рис. 2. Динамика экстракции полимерных композиций водно-спиртовым раствором различной концентрации

Из представленных на рисунках данных можно сделать ряд выводов:

1. С ростом концентрации этанола в экстрагенте степень экстракции мономера растет.
2. По количеству перешедших в экстрагент продуктов экстракции полимерные композиции можно расположить в следующей последовательности по убыванию:

Вертекс.  
 Протакрил.  
 Фторекс.  
 Бесцветная пластмасса.  
 Этакрил.

3. Количество перешедших в экстракт мономеров пропорционально их содержанию в полимере после формования изделия из него.

### Библиографические ссылки

1. Грушко Я.М. Вредные органические соединения в промышленных сточных водах: Справочник. Л. : Химия, 1982. 434 с.
2. Спектрофотометрическое определение метилметакрилата как способ контроля качества стоматологических изделий / Н. В. Власова, Кузьмин Г. В., Блиникова А. В. // Вестник ОмГУ. 1999. Вып.1. С. 33 34.
3. Изучение диффузных процессов в ПВХ пластикатах и полиакрилатах / Л. В. Ладыгина, Карнакова О. В., Калмыков В. В. и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6. № 1. С. 163 165.
4. Рыбакова А. Н. Материаловедение в стоматологии. М. : Медицина, 1984. 345 с.
5. Влияние различных факторов на свойства базисного стоматологического полимерного материала / Я. В. Костров, Белоконова Н. А., Жолудев С. Е. и др. // Проблемы стоматологии. 2016. Т. 12. №1. С.78 84.
6. Дорогова В. Б., Игнатьева Л. П. Методы фотометрического анализа в санитарно-гигиенических исследованиях. М. : Издательский дом «Академия Естествознания», 2013. 102 с.

### Referenses

1. Grushko YA. M. *Vrednyye organicheskiye soyedineniya v promyshlennykh stochnykh vodakh* [Harmful organic compounds in industrial wastewater]: Spravochnik. L, Khimiya, 1982, 434 p.
2. Vlasova N. V., Kuzmin G. V., Blinnikova A. V. [Spectrophotometric determination of methyl methacrylate as a method of quality control of dental products]. *Vestnik OmGU*. 1999, Issue 1. p. 33 34 (In Russ.).
3. Ladygina L. V., Karnakova O. V., Kalmykov V. V., Shutilin Yu. F., Ivannikov V. A. [Study of diffuse processes in PVC plastic compounds and polyacrylates] *Sorption and chromatographic processes*. 2006, v. 6. no. 1, p. 163 165 (In Russ.).
4. Rybakova A. N. *Materialovedeniye v stomatologii* [Materials science in dentistry]. Moscow, Medicine, 1984. 345 p.
5. Kostrov Ya. V., Belokonova N. A., Zholudev S. E., Vshivkov S.A., Galyas A. G. [Influence of various factors on the properties of the basic dental polymeric material] / *Problems of Dentistry*, 2016, vol.12. no. 1, p.78 84 (In Russ.).
6. Dorogova V. B., Ignatieva L. P. *Metody fotometrcheskogo analiza v sanitarno-gigiyenicheskikh issledovaniyakh* [Methods of photometric analysis in sanitary and hygienic research]. Moscow, Publishing House "Academy of Natural History", 2013. 102 p.

© Чижов Ю. В., Пен В. Р., Левченко С. И., Маскадынов Л. Е., 2022



**Секция**

**«ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»**

УДК 504.3.054

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАССЕЙЯНИЯ NO<sub>2</sub>

Е. Н. Бельская<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 информационных и вычислительных технологий  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, проспект Мира, 53

\*E-mail: ketrin\_nii@mail.ru

*Рассмотрена параметризация процессов рассеяния NO<sub>2</sub>, с учётом особенностей распространения, что упрощает прогнозирование концентраций данного вещества в уличных каньонах.*

*Ключевые слова: атмосферные загрязнения, первичные выбросы, окислительные реакции, токсичность.*

## PARAMETERIZATION OF NO<sub>2</sub> SCATTERING PROCESSES

E. N. Bel'skaya<sup>1</sup>, O. V. Taseiko<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: ketrin\_nii@mail.ru

*The parametrization of NO<sub>2</sub> scattering processes is considered, taking into account the peculiarities of its distribution, which simplifies the prediction of concentrations of this substance in street canyons.*

*Keywords: atmospheric pollution, primary emissions, oxidative reactions, toxicity.*

Многочисленные исследования последних лет доказывают, что влияние города усиливается участием атмосферных загрязнений урбанистического происхождения. Окислы азота (NO<sub>x</sub>, NO и NO<sub>2</sub>) образуются в результате процессов сгорания и выхлопов автомобилей и играют важную роль в химии тропосферы, в частности в процессах фотохимической генерации и разрушения озона. Концентрация окислов азота влияет на содержание свободных радикалов и на скорость удаления из загрязненного воздуха летучих органических соединений, в том числе – токсичных, в последние годы концентрация этих газов в атмосфере увеличилась. Среди всех газов, участвующих в загрязнении воздуха городской среды, озон (O<sub>3</sub>) и диоксид азота (NO<sub>2</sub>) являются соединениями, обнаружение которых имеет первостепенное значение из-за их токсичности.

Большая часть NO<sub>x</sub> из трафика выделяется как NO, что менее опасно, чем NO<sub>2</sub> [1,2]. Однако NO<sub>2</sub> может являться как результатом прямого выброса, так и окислительных реакций при взаимодействии химических веществ. При прогнозировании концентраций необходимо также учитывать процессы их образования и рассеяния с учётом траекторий переноса. Из работ многих исследователей ясно, что величина прямого выброса NO<sub>2</sub> (выхлопы транспортных средств) имеет важное значение [2,3], однако мало что известно об изменении первичных выбросов NO<sub>2</sub> в крупных городских районах. Чаще всего предполагается, что NO<sub>2</sub> составляет 5,0 % по объёму от общего количества NO<sub>x</sub> в выхлопных газах транспортных средств [4]. Результаты исследований также подчеркивают потенциальную важность дизельных транспортных средств, средняя доля первичного NO<sub>2</sub> в которых, по оценкам, составляет 12,7% [3] и 11,8% [3].

Градиент общего окислителя (определяемый как NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>) используется для получения оценки первичного NO<sub>2</sub>, однако "подход с полным окислителем" требует измерения NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и O<sub>3</sub> для оцен-

ки потенциального вклада первичного  $\text{NO}_2$ . Одним из наиболее важных факторов, определяющих образование  $\text{NO}_2$  в уличном каньоне после концентрации  $\text{NO}$ , является концентрация озона. Несмотря на то, что химическое образование  $\text{NO}_2$  вблизи источников выбросов  $\text{NO}_x$  следует простой и хорошо изученной химии, фактическое количество  $\text{NO}$ , преобразованного в  $\text{NO}_2$ , в окружающей среде трудно определить на практике. На сегодняшний день  $\text{O}_3$  не входит в перечень приоритетных химических соединений, при изучении влияния окружающей среды на здоровье человека. Для определения же вторичного  $\text{NO}_2$  необходимы знания о концентрациях  $\text{O}_3$ , содержащихся в атмосфере города. Процесс окисления  $\text{NO}$  происходит круглосуточно. Обратный процесс, фото диссоциация  $\text{NO}_2$ , идет только днем, в процессе фото диссоциации  $\text{NO}_2$  освобождается атом кислорода, который участвует в образовании озона [5].

Если значительная доля наблюдаемых концентраций  $\text{NO}_2$  является результатом первичного происхождения, то необходим метод определения первичной доли  $\text{NO}_2$  в выбросах дорожно-транспортных средств на основе анализа имеющихся комплексных данных мониторинга загрязнения воздуха. Важно понимать источники  $\text{NO}_2$  в городской среде. Часто соотношение между концентрациями этих газов имеет более сложный вид, поскольку в реальных условиях в систему взаимодействий  $\text{O}_3$ - $\text{NO}_x$  включаются продукты окисления  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и других летучих органических соединений. В результате действия каталитических циклов происходит либо генерация, либо разрушение озона. Поскольку окислы азота играют ключевую роль в химии атмосферы, для понимания процессов, происходящих в атмосфере, необходимо знать особенности их пространственного распределения и временной изменчивости.

Взаимосвязь между  $\text{NO}_x$  и  $\text{NO}_2$  можно описать, рассмотрев среднюю концентрацию  $\text{NO}_2$  для различных интервалов  $\text{NO}_x$ . Во-первых, существует вклад фоновых источников, почти в 50% наблюдаемого  $\text{NO}_2$ . Во-вторых, существует вклад первичного  $\text{NO}_2$  – выбросы от автомобильного движения и наконец, вклад от реакции между  $\text{NO}$  и  $\text{O}_3$  в непосредственной близости от улицы.

При концентрациях  $\text{NO}_x \ll 100 \text{ ppbv}$ , что согласно конвертеру единиц концентрации газов, соответствует  $0,19 \text{ мг/м}^3$ , прирост придорожного содержания  $\text{NO}_2$ , в дополнение к фоновой концентрации, определяется местной химией и резко возрастает из-за наличия  $\text{O}_3$  для реакции с  $\text{NO}$ . При концентрациях  $\text{NO}_x > 100 \text{ ppbv}$  скорость увеличения  $\text{NO}_2$  резко снижается, и взаимосвязь между  $\text{NO}_x$  и  $\text{NO}_2$  становится почти линейной. По мере увеличения  $\text{NO}_x$  до  $600 \text{ ppb}$  ( $1,15 \text{ мг/м}^3$ ) вклад первичного  $\text{NO}_2$  увеличивается и выбросы преобладают над приростом. Эти два контролирующих влияния на увеличение концентрации  $\text{NO}_2$  на обочине обеспечивают основу для оценки первичной доли  $\text{NO}_2$  в выбросах транспортных средств. Исследования выбросов  $\text{NO}_2$  транспортными средствами показывают значительно различающиеся количества первичного  $\text{NO}_2$ , который зависит от типа топлива, технологии транспортного средства и условий его эксплуатации.

Результаты зарубежных исследований позволяют предположить, что средняя первичная доля  $\text{NO}_2$  от выбросов транспортных средств варьируется в широких пределах от 3,2% до 23,5% по объему для разных дорог, со средним значением 10,6%. Доли первичных выбросов  $\text{NO}_2$  такой величины намного выше, чем часто предполагаемые 5% по объему, используемые для прогнозирования концентраций  $\text{NO}_2$  в городах. Точность первичной доли  $\text{NO}_2$  зависит от наличия (отсутствия) информации об уровнях непосредственно выделяемого  $\text{NO}_2$ . Существуют лишь ограниченные данные об измеренных выбросах  $\text{NO}_2$  от отдельных транспортных средств.

Анализ суточной динамики окислов азота показывает, что она отражает уровень загрязненности воздуха в конкретном (рассматриваемом) регионе, поскольку суточный ход  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  существенно различается для фоновых и промышленных районов.

В городских условиях, в осенний период концентрация  $\text{NO}$  имеет четко выраженный суточный ход с двумя характерными максимумами в 11 и 18 ч. и минимумом в ночное время [5]. Утренний и вечерний максимум концентрации  $\text{NO}$  приходится на периоды наиболее интенсивной работы автотранспорта. Суточные изменения двуокси азота менее резкие, концентрация увеличивается в течение всего дня, достигая максимальных значений в 17-20 ч. Утреннее увеличение окиси азота характерно для всех сезонов, однако, дневной ход резко различается от сезона к сезону.

На сегодняшний день существует нехватка данных, связанных с первичными  $\text{NO}_2$ , поскольку в большинстве кадастров выбросов учитывается только общие выбросы  $\text{NO}_x$ . Очевидна необходимость улучшенных данных о содержании  $\text{O}_3$  в атмосферном воздухе и выбросах первичного  $\text{NO}_2$  от автомобильного транспорта и других значительных городских источников.

### Библиографические ссылки

1. Alain Pauly, Jérôme Brunet, Christelle Varenne, Bernard Lauron, Vicente Parra, Marcel Bouvet, Marc Dubois, André Hamwi. A Chemical Microsystem for selective detection of polluting gases in vehicle compartments. HAL Id: hal-00282447 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00282447>. Submitted on 27 May 2008.
2. Latham, S., Kollamthodi, S., Boulter, P.G., Nelson, P.M., Hickman, A.J., 2001. Assessment of primary NO<sub>2</sub> emissions, hydrocarbon speciation and particulate sizing on a range of road vehicles. Transport Research Laboratory (TRL), PR/SE/353/2001.
3. David C. Carslaw, Sean D. Beevers. Estimations of road vehicle primary NO<sub>2</sub> exhaust emission fractions using monitoring data in London. Atmospheric Environment 39 (2005) p. 167–177.
4. Berkowicz, R., 2000. OSPM—a parameterised street pollution model. Environmental Monitoring and Assessment 65 (1–2), p. 323–331.
5. Распределение окислов азота в приземном слое атмосферы над континентальными районами России. Т.А. Маркова, Н.Ф. Еланский, И.Б. Беликов, А.М. Грисенко, В.В. Севастьянов <https://auto-dnevnik.com/docs/index-6450.html>

### References

1. Alain Pauly, Jérôme Brunet, Christelle Varenne, Bernard Lauron, Vicente Parra, Marcel Bouvet, Marc Dubois, André Hamwi. A Chemical Microsystem for selective detection of polluting gases in vehicle compartments. HAL Id: hal-00282447 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00282447>. Submitted on 27 May 2008.
2. Latham, S., Kollamthodi, S., Boulter, P.G., Nelson, P.M., Hickman, A.J., 2001. Assessment of primary NO<sub>2</sub> emissions, hydrocarbon speciation and particulate sizing on a range of road vehicles. Transport Research Laboratory (TRL), PR/SE/353/2001.
3. David C. Carslaw, Sean D. Beevers. Estimations of road vehicle primary NO<sub>2</sub> exhaust emission fractions using monitoring data in London. Atmospheric Environment 39 (2005) p. 167–177.
4. Berkowicz, R., 2000. OSPM—a parameterised street pollution model. Environmental Monitoring and Assessment 65 (1–2), p. 323–331.
5. *Raspredelenie okislov azota v prizemnom sloe atmosfery nad kontinentalnimi raionami Rossii* [Distribution of nitrogen oxides in the surface layer of the atmosphere over the continental regions of Russia]. Т.А. Markova, N.F. Elanskii, I.B. Belikov, A.M. Grisenko, V.V. Sevasnyanov <https://auto-dnevnik.com/docs/index-6450.html>

© Бельская Е. Н., Тасейко О. В., 2022

УДК 628.511

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

И. С. Ефремова<sup>1\*</sup>, У. С. Постникова<sup>2</sup>, Т. А. Саулова<sup>2</sup>, О. В. Тасейко<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:\*efremovais00@mail.ru

*В работе представлен способ повышения класса чистоты производственных помещений. Доказан положительный эффект применения природно-технической системы, состоящей из цитрусовых растений и искусственного ионизатора воздуха.*

*Ключевые слова: класс чистоты, природно-техническая система, запыленность.*

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PREMISES AIR PURIFICATION

I. S. Efremova<sup>1\*</sup>, T. A. Saulova<sup>2</sup>, O. V. Taseiko<sup>2</sup>, U. S. Postnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79 Svobodny Ave., 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:\*efremovais00@mail.ru

*The paper presents a way to improve the cleanliness class of industrial premises. The positive effect of using a natural-technical system consisting of citrus plants and an artificial air ionizer has been proven.*

*Keywords: purity class, natural-technical system, dustiness.*

Основным требованием к производственным помещениям, в том числе в ракетно-космической и авиационной отрасли является высокий класс чистоты. Важная роль при этом отводится значению счетной концентрации аэрозольных частиц, в отличие от массовой концентрации загрязнений, в воздухе применяемой для иных рабочих зон [1]. Вопросами проектирования, испытания, эксплуатации и биозагрязненности чистых помещений занимается Международная организация стандартизации (ISO), которая устанавливает классы и значения предельных концентраций частиц аэрозолей в чистом помещении [2]. Необходимый уровень чистоты достигается в основном за счет наличия высокоэффективной системы фильтрации.

В работе предлагается инновационный способ очищения помещения с помощью природно-технических систем. Применение природно-технической системы в виде фитостены «Фитоионика» позволит снизить уровень запыленности за счёт способности растений снижать уровень пыли, а также с помощью искусственной ионизации. Целью исследования является определение влияния искусственной ионизации на способность цитрусовых растений снижать концентрацию пыли в воздушной среде.

Выбор цитрусовых растений обусловлен наличием у них эргономических свойств, повышающих работоспособность [3].

Для проведения эксперимента саженцы цитрусовых были разделены на 2 группы – Группу «И» и Группу «Н». Группа «И» в течение 2 недель подвергалась обработке искусственной ионизацией воздуха. Навеска древесной пыли распылялась с помощью фена в замкнутом пространстве в течение 5 секунд. Измерение суммарной концентрации пыли без учета фракционного состава с помощью ана-

лизатора пыли DustTrak 8530 выполнялась на протяжении 30 минут. В качестве контроля та же процедура проводилась в замкнутом воздушном пространстве при отсутствии растений – Группа К.

На графике, представленном на рис. 1, прослеживается динамика снижения концентрации пыли. Концентрация пыли в Группе «Н» снизилась несколько быстрее, чем в контрольной Группе «К». 13 мг/м<sup>3</sup> в Группе «Н» и 10 мг/м<sup>3</sup> в Группе «К». Наилучший результат показала группа «И», в которой за 20 минут было достигнуто снижение концентрации пыли на 25 мг/м<sup>3</sup>.

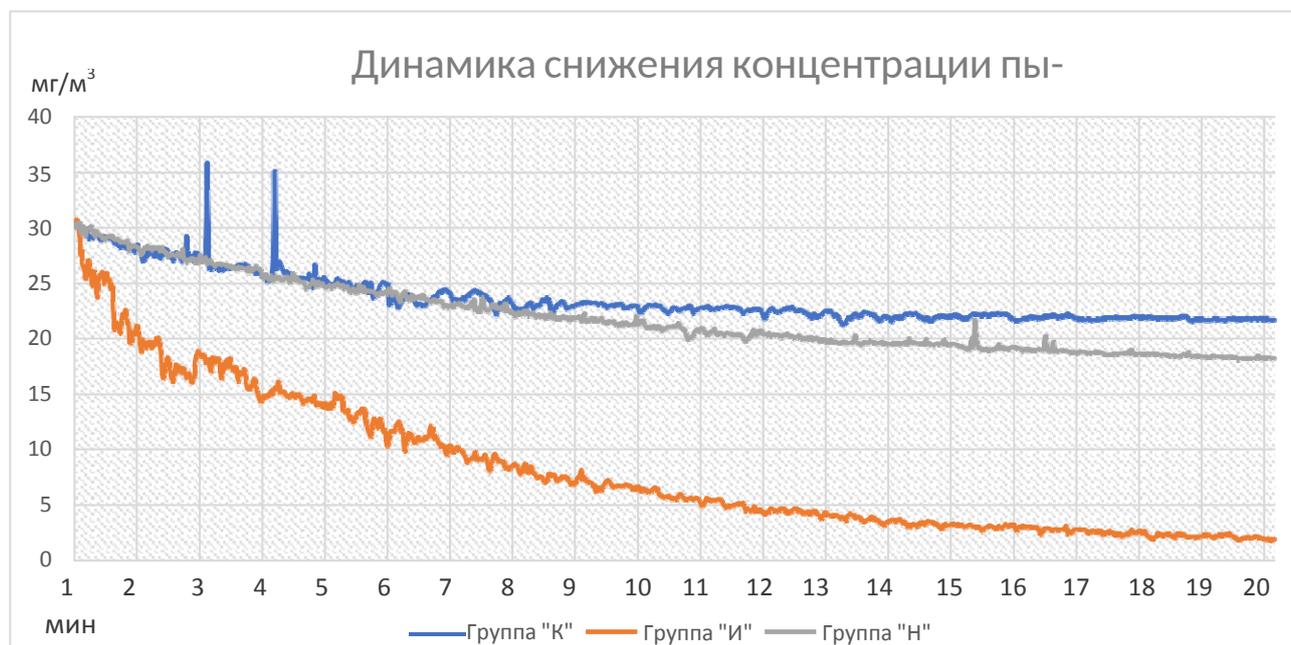


Рис. 1 Динамика снижения концентрации пыли

Обработка citrusовых растений искусственной ионизацией воздуха положительным образом влияет на их способность к осаждению пыли. Подготовленные растения позволили осадить мелкодисперсную пыль в 2 раза быстрее неподготовленных. Результат показал целесообразность использования citrusовых растений в природно-технических системах, оснащенных искусственной ионизацией воздуха.

Применение данной модели совместно с системой вентиляции позволит решить сразу несколько задач:

- повысить класс чистоты производственных помещений ракетно-космической и авиационной отрасли;
- снизить бактериальную нагрузку воздуха рабочей зоны [4];
- увеличить концентрацию отрицательных ионов воздуха за счет искусственной ионизации воздушной среды [5];
- повысить работоспособность сотрудников предприятия [3].

#### Библиографические ссылки

1. Борисова, Я. П. Методы контроля чистой среды при производстве космического аппарата / Я. П. Борисова // Исследования наукограда. 2012. № 2(2). 11-16 с.
2. ГОСТ Р ИСО 14644-1–2017 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц». Дата введения 01.12.2018 г.
3. Ефремова, И. С. Анализ эргономических свойств растений в фитомодуле для помещений различного назначения / И. С. Ефремова // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 25–26 апреля 2019 года. 605-607 с.
4. Саулова Т. А. Использование фитоионизации для очистки воздушной среды производственных помещений / Т. А. Саулова : дис. На соискание учёной степени канд. техн. наук. Красноярск: СибГТУ, 2001. 216 с.

5. Курников, А. С. Искусственная ионизация воздуха / А. С. Курников, А. С. Ширшин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2005. № 13. 82-97 с.

### References

1. Borisova, Ya. P. Methods of control of the clean environment in the production of spacecraft / Ya. P. Borisova // Research of the science city. 2012. № 2(2). Pp. 11-16.
2. GOST R ISO 14644-1-2017 "Clean rooms and associated controlled environments. Part 1. Classification of air purity by particle concentration". Date of introduction 01.12.2018.
3. Efremova, I. S. Analysis of ergonomic properties of plants in a phytomodule for premises of various purposes / I. S. Efremova // 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, Krasnoyarsk, April 25-26, 2019.– Pp. 605-607.
4. Saulova T. A. The use of phytoionization for cleaning the air environment of industrial premises / T. A. Saulova : dis. For the degree of Candidate of Technical Sciences. Krasnoyarsk: SibSTU, 2001. 216 p.
5. Kournikov, A. S. Artificial ionization of air / A. S. Kournikov, A. S. Shirshin // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. 2005. No. 13. pp. 82-97.

© Ефремова И. С., Постникова У. С., Саулова Т. А., Тасейко О. В., 2022

УДК 613.648.4

## АНАЛИЗ ВИДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ И СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ АТОМНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ФГУП «ГХК»

Ю. А. Желтухина, П. Н. Кускашов, 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: pensionerkaaa@mail.ru

*В статье проведён анализ влияния радиации на здоровье человека, определены её источники, на примере ФГУП «ГХК», рассмотрены принципы и способы защиты от ионизирующих излучений.*

*Ключевые слова: анализ, радиация, ионизирующее излучение, меры защиты.*

## ANALYSIS OF THE TYPES OF IMPACT AND METHODS OF PROTECTION AGAINST IONIZING RADIATION ON THE EXAMPLE OF THE NUCLEAR ENTERPRISE FSUE «MCC»

J. A. Zheltukhina, P. N. Kuskashov, E. N. Belskaya

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

*The article analyzes the impact of radiation on human health, identifies its sources, using the example of the Federal State Unitary Enterprise Mining and Chemical Combine, and considers the principles and methods of protection against ionizing radiation.*

*Keywords: analysis, radiation, ionizing radiation, protection measures.*

На сегодняшний день примерно 38,2% работников промышленных предприятий подвергаются воздействию негативных факторов производственной среды. Недостаточный контроль со стороны работодателей к вопросам охраны труда является основной причиной профессиональных заболеваний на рабочих местах, что влечёт большие расходы. Необходимо своевременно финансировать работы по улучшению контроля за соблюдением мер безопасности и проводить проверки состояния оборудования на промышленных производствах. Однако, стоит отметить, что среди работников часто наблюдается халатное отношение к правилам техники безопасности, что приводит на атомных промышленных предприятиях к облучению персонала.

С учётом соблюдения всех мер безопасности, сотрудники атомных предприятий ежедневно подвержены определённой дозе облучения, которая входит в диапазон безопасного уровня воздействия на организм. По данным Росстата, в Российской Федерации удельный вес численности работников, занятых сбором, обработкой и утилизацией отходов, из которых занятые на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, составляет 33% от общего числа работников и примерно 3% из них подвержены воздействию ионизирующих излучений. В Красноярском крае удельный вес численности работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда в организациях, на конец 2021 года составляет около 49,4% от общего числа сотрудников [1]. В статистике смертности населения на территории ЗАТО Железногорск лидирующие места занимают [2]:

- Болезни системы кровообращения (54,2 %), РФ – 47,2 %;
- Новообразования (21,6 %), РФ – 16,1 %;
- Болезни органов пищеварения (5,8 %), РФ – 5,1%;
- Болезни органов дыхания (3,3 %), РФ – 3,4 %.

Ионизирующее излучение – это явление, связанное с радиоактивностью (самопроизвольным превращением ядер атомов одних элементов в другие, сопровождающимся испусканием ионизирующих излучений). Последствиями радиационных загрязнений являются пагубное воздействие нейтронов,  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -лучей, образовавшихся при взрыве или ином выбросе продуктов распада радиоактивных веществ, на живые организмы, одежду, растения, почву, воду в водоёмах и атмосферный воздух.

Обладая относительно большой массой и зарядом,  $\alpha$ -частицы имеют незначительную ионизирующую способность: длина их пробега в воздухе составляет 2,5 см, в биологической ткани – 31 мкм, их с лёгкостью может задержать на себе ткань одежды или слой омертвевшей кожи. Для  $\beta$ -частиц характерна высокая удельная плотность ионизации биологической ткани, длина пробега в воздухе составляет 17,8 м. Удельная плотность ионизации, создаваемая  $\beta$ -частицами, примерно в 1000 раз меньше, чем для  $\alpha$ -частиц той же энергии.  $\gamma$ -излучения обладают высокой проникающей способностью, длина пробега их в воздухе достигает сотен метров, при воздействии на организм разрушает все структуры. Эффект воздействия источников ионизирующих излучений на организм зависит от ряда причин, главными из которых принято считать уровень поглощённых доз, время облучения и мощность дозы, объём тканей и органов, вид излучения. Даже кратковременного воздействия на организм человека достаточно, чтобы нанести непоправимый вред здоровью. Если принять в качестве критерия чувствительности к ионизирующему излучению морфологические изменения, то клетки и ткани организма человека по степени возрастания чувствительности можно расположить в следующем порядке: нервная ткань; хрящевая и костная ткань; мышечная ткань; соединительная ткань; щитовидная железа; пищеварительные железы; лёгкие; кожа; слизистые оболочки; половые железы; лимфоидная ткань, костный мозг.

Пренебрегая санитарно-гигиеническими нормативами и правилами техники безопасности, работники подвергаются воздействию ионизирующего излучения на локальных рабочих площадках с радиационными загрязнениями, наиболее вероятными источниками которых на ФГУП «ГХК» являются [3]:

- транспортирование и хранение отработанного ядерного топлива (ОЯТ);
- вывод из эксплуатации объектов оборонного комплекса;
- строительство «сухого» и эксплуатация «мокрого» хранилища ОЯТ;
- создание завода по производству МОКС-топлива для реакторов на быстрых нейтронах;
- создание опытно-демонстрационного центра (ОДЦ) по радиохимической переработке ОЯТ;
- выбросы в результате переработки плутония.

Основные принципы обеспечения радиационной безопасности на рабочих местах:

- уменьшение мощности источников до минимальных величин (защита количеством);
- сокращение времени работы с источниками (защита временем);
- увеличение расстояния от источника до работающих (защита расстоянием) и экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующие излучения (защита экранами).

Способы защиты персонала:

1. Использование принципов защиты, применяемых при работе с источниками излучения в закрытом виде.
2. Герметизация производственного оборудования с целью изоляции процессов, которые могут явиться источниками поступления радиоактивных веществ во внешнюю среду.
3. Применение санитарно-гигиенических устройств и оборудования, использование специальных защитных материалов.
4. Использование средств индивидуальной защиты персонала: специальные защитные плёночные костюмы, состоящие из полимерных материалов; специальные пневмокостюмы, плёночные туфли или специальные ботинки, чехлы из парусиновой ткани; для предотвращения попадания неочищенного воздуха в дыхательные пути сотрудников – респираторы (противогазы) и шланговые конструкции, которые позволяют подавать незагрязнённый воздух из безопасного источника; при контакте с веществами, радиационный уровень которых превышает 10 мкКи для защиты рук необходимо использовать просвинцованные резиновые перчатки с гибкими нарукавниками; для защиты глаз используют очки закрытого типа, стекло которых должно содержать свинец или фосфат вольфрама. Каждое средство защиты должно быть устойчиво к обработке и соответствовать ГОСТу.
5. Выполнение правил личной гигиены, которые предусматривают личностные требования к работающим с источниками ионизирующих излучений: запрещение курения в рабочей зоне, тщательная

очистка (дезактивация) кожных покровов после окончания работы, проведение дозиметрического контроля загрязнения спецодежды, спецобуви и кожных покровов.

Таким образом, в целях обеспечения безопасности сотрудников атомных промышленных производств следует строго соблюдать требования СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы» и СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)».

### Библиографические ссылки

1. Удельный вес численности работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, в организациях. [Электронный ресурс]. URL [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl\\_trud1.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl_trud1.xlsx) (дата обращения 05.09.2022).

2. Отчёт по экологической безопасности. [Электронный ресурс]. URL <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/2d8/2d835a8215d7da8ac3e3d4c0548d4871.pdf> (дата обращения 05.09.2022).

3. Горно-химический комбинат. [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Горно-химический\\_комбинат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Горно-химический_комбинат) (дата обращения 05.09.2022).

### References

1. The proportion of the number of employees engaged in work with harmful and (or) dangerous working conditions in organizations. Available at: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl\\_trud1.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl_trud1.xlsx) (accessed 05.09.2022).

2. Environmental Safety Report. Available at: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/2d8/2d835a8215d7da8ac3e3d4c0548d4871.pdf> (accessed 05.09.2022).

3. Mining and chemical plant. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Горно-химический\\_комбинат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Горно-химический_комбинат) (accessed 05.09.2022).

© Желтухина Ю. А., Кускашов П. А., Бельская Е. Н., 2022

УДК 626:556.18

## СОСТОЯНИЕ И КАЧЕСТВО РЕКИ КАЧА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

В. Б. Калекулин, Е. А. Гудаева

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

*В статье представлен анализ состояния качества реки Кача, дана оценка загрязняющих веществ за 2017-2021 гг. на основании данных Краевой подсистемы мониторинга поверхностных вод суши.*

*Ключевые слова: река, индекс загрязнённости воды, экологическая эффективность.*

## STATE AND QUALITY OF THE KACHA RIVER IN THE KRASNOYARSK REGION

V. B. Kalekulin, E. A. Gudaeva

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

*The article presents an analysis of the state of the quality of the Kacha River, an assessment of pollutants for 2017-2021 is given. based on data from the Regional subsystem for monitoring land surface waters.*

*Keywords: river, water pollution index, ecological efficiency.*

В настоящее время прослеживается неблагоприятная тенденция ухудшения состояния водных объектов на территории Российской Федерации, что в большей степени связано с антропогенной деятельностью человека, а также природными стихийными бедствиями.

Если рассматривать крупные водные артерии России, то их качество и состояние за последние 5 лет достигли неудовлетворительной оценки. Все они считаются загрязненными или очень загрязненными, в отдельных случаях – чрезвычайно загрязненными. Такое положение водных экосистем является причиной увеличения различных заболеваний населения, гибели флоры и фауны.

Многолетними наблюдениями за динамикой качества поверхностных вод установлена тенденция к увеличению числа случаев высокого, даже экстремального содержания загрязняющих веществ. Состояние водных объектов на территории Российской Федерации в настоящее время они не гарантируют качественной питьевой воды, что требует особого внимания. Ухудшающаяся ситуация наблюдается на крупных водных артериях, как Волга, Днепр, Амур, Енисей и нескольких озерах страны.

В мировой практике снижение стока воды, резкое снижение качества воды отмечается на реках Рейн, Темза, Миссисипи, Огайо, Сена.

На решение проблем во многих странах выделено крупное финансирование. Однако, ряд развитых стран, чтобы снизить загрязнение в принадлежащих им водных объектах, стали переводить предприятия, осуществляющие сброс неочищенных вод, в развивающиеся страны, что не решило проблему загрязнения Мирового океана.

На территории Красноярского края находится более трехсот тысяч водоемов, 7 крупных водохранилищ, протекает большое количество рек, которые играют одну из главных ролей в регулировании стока воды и его обновлении.

Реки Красноярского края неоднократно попадали в список самых грязных рек на территории Российской Федерации, в том числе небольшая река Кача, которая берет начало в Емельяновском районе, на Кемчугском нагорье. Длина реки составляет 119 км. Площадь водосбора 1270 км<sup>2</sup>. В верховье Кача – типичная горная река с довольно узкой долиной, покрытой тайгой. В лесостепной зоне она

имеет хорошо развитую долину с некоторыми контурами террас. Поверхность поймы ровная, местами избыточно увлажнена, покрыта кустарником и луговым разнотравьем [2].

В течение 5 лет уровень в реке снизился, четко прослеживаются признаки загрязнения. Распространенными загрязняющими веществами в реке являются фенолы, нефтепродукты, соединения металлов: железо общее, алюминий, медь, марганец, цинк и ХПК. Река протекает через несколько населенных пунктов, которые разрастаются с каждым годом, тем самым, увеличивая нагрузку на речную систему Качи.

По береговой линии люди выбрасывают мусор, проводят канализационные стоки в водный объект. Кроме того, ведутся работы по разработке грунта, за счет чего береговая линия реки отступила приблизительно на 2 м.

Если рассматривать черту города, то можно увидеть результат мелиоративных работ на реке Кача. С 2000 года проведены мероприятия по устройству набережной до устья реки, ежегодно вырезается поросль, убирается мусор в водоохранной зоне. Однако качество воды в реке ухудшается.

Режимные наблюдения за загрязнением воды реки Кача проводятся в двух пунктах наблюдения государственной наблюдательной сети (ГНС): выше и в черте г. Красноярска. В 2020 году возобновлены наблюдения на пункте «выше п. Памяти 13 Борцов».

В 2018 г. в соответствии с классификацией качества воды по значению удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ) река Кача относилась к 4 классу, разряд «а» (грязная). По сравнению с 2018 годом, в створе выше Красноярска качество реки осталось прежним, в створе «в черте города Красноярска» ухудшилось и оценивается 4 классом, разряд «б», табл. 1 [3].

Таблица 1

**Качество воды реки Кача по значению УКИЗВ в 2017-2021 гг.  
(по данным Краевой подсистемы мониторинга поверхностных вод суши)**

Показатели/годы	2017	2018	2019	2020	2021
класс, разряд	4, а	4, а	4, б	4, а	4, а
степень загрязненности	грязная	грязная	грязная	грязная	грязная

Содержание ионов марганца, поступающих, в основном, в процессе отмирания и разложения гидробионтов, практически не меняется. Максимальные концентрации отмечались в 2018 г.: в створе «в черте г. Красноярск» – 20,2 ПДК, в створе «выше г. Красноярск» – 20,8 ПДК. В сравнении с 2019 г. концентрации некоторых ионов в воде снизилось в 2020 г.: ионы марганца, меди, алюминия и цинка. Однако в 2021 г. вновь отмечается превышение, кроме алюминия, содержание которого сведено к нулю. По остальным загрязняющим веществам отмечается увеличение. Содержание фенолов осталось на прежнем уровне [4-6].

Причиной концентрации ионов железа (0,191-0,443 мг/дм<sup>3</sup>) является их поступление с поверхности водосбора и подземным стоком в период наступления плюсовых температур.

Одной из значимых причин загрязнения источников пресной воды является рост хозяйственной деятельности человека, который ведет к усугублению состояния малых рек, к негативному состоянию всего речного бассейна.

Такая цепочка определяет загрязненность крупных рек. И аналогичная картина прослеживается не только в реке Кача, но практически во всех притоках реки Енисей, во всех малых и крупных реках России.

К основным причинам снижения качества воды и истощения водных ресурсов можно отнести нерациональный отбор воды из водных объектов, разработку месторождений полезных ископаемых, сброс промышленных, бытовых, сельскохозяйственных сточных вод и другие факторы. Огромное количество продуктов жизнедеятельности человека попадает в источники пресной воды, строительство различных гидротехнических сооружений ведет к нарушению стока, разрушая не только целостность водных экосистем, но и видовое разнообразие биоценозов.

В сравнении с мировыми странами Россия занимает далеко не первое место по индексу экологической эффективности (*The Environmental Performance Index*) в 2016 г. Россия занимала 32 место из 180 стран мира. В 2022 году экологическая составляющая страны сдвинулась на 112.

Исследование экологической эффективности измеряет достижения страны с точки зрения состояния экологии и управления природными ресурсами на основе 22 показателей в 10 категориях, которые отражают различные аспекты состояния окружающей природной среды и жизнеспособности её экологических систем, сохранение биологического разнообразия, противодействие изменению климата, состояние здоровья населения, практику экономической деятельности и степень ее нагрузки на окружающую среду, а также эффективность государственной политики в области экологии [7].

Состояние водных объектов, качество используемой воды вносит существенный вклад в определение вышеуказанных показателей.

Для решения экологической проблемы в государстве необходимо: вводить мощности для очистки сточных вод; увеличивать вложения в их очистку; проводить преобразования государственной системы в области использования, охраны водных объектов; продолжать работу по сохранению водных экосистем с привлечением волонтерского движения; выполнять мероприятия по реконструкции существующих и строительству новых очистных сооружений промышленных и ливневых стоков на предприятиях города; осуществлять работы по берегоукреплению и обустройству прибрежной зоны рек; осуществлять контроль загрязнения поверхностных водных объектов; проводить экологическое просвещение населения.

Только при условии выполнения всех мероприятий, связанных с экологической безопасностью; реализацией программ, разработанных и действующих в нашей стране, будет достигнуто снижение загрязняющей компоненты (уменьшение объемов сбросов загрязненных сточных вод и объемов водопотребления на технологические нужды, поддержание в чистоте береговой зоны).

Бассейны притоков главной артерии Красноярского края, в том числе реки Кача необходимо охранять в значительной степени, поскольку многие ее притоки находятся в населенных пунктах, население которых используют водные ресурсы с наличием загрязненных веществ, опасных для здоровья. Необходимо организовать более тщательный надзор водоохраных зон не только отдельных частей реки, а всего бассейна реки Кача.

Для населения следует разместить еще больше оповестительных знаков «Водоохранная зона», «Запрещено выбрасывать мусор!», «Запрещено мытье автомобилей!»; проводить постоянные выезды для контроля береговой зоны; осуществлять контроль источников загрязнения водного объекта.

### Библиографические ссылки

1. Кoryтны, Л. М. Реки Красноярского края. Красноярск : Краснояр. кн. изд-во, 1991. 157 с.
2. Мусор с территории мэрии Красноярска привел к массовой гибели рыб в Каче. URL: <https://www.babr24.com/?IDE=193448> (дата обращения: 07.09.2022).
3. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае» за 2018 год. URL: <http://krasecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4-2018%20> (01.11.2019).pdf (дата обращения: 09.09.2022).
4. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае» за 2019 год. URL: [http://mpr.krskstate.ru/dat/bin/art/45884\\_svodnij\\_doklad\\_2019.pdf](http://mpr.krskstate.ru/dat/bin/art/45884_svodnij_doklad_2019.pdf) (дата обращения: 09.09.2022).
5. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае» за 2020 год. URL: <http://www.krsecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20-%202020.pdf> (дата обращения: 09.09.2022).
6. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае» за 2021 год. URL: <http://www.krsecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20-%202021.pdf> (дата обращения: 09.09.2022).
7. Рейтинг стран по уровню экологии. Nonews. URL: <https://nonews.co/directory/lists/countries/ecology> (дата обращения: 09.09.2022).

### References

1. Korytny, L. M. Rivers of the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. book. publishing house, 1991. 157 p.

2. Garbage from the territory of the Krasnoyarsk City Hall led to the mass death of fish in Kacha. URL: <https://www.babr24.com/?IDE=193448> (accessed: 07.09.2022).

3. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory" for 2018. URL: [http://krasecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4-2018%20\(11/01/2019\).pdf](http://krasecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4-2018%20(11/01/2019).pdf) (accessed: 09.09.2022).

4. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory" for 2019. URL: [http://mpr.krskstate.ru/dat/bin/art/45884\\_svodnij\\_doklad\\_2019.pdf](http://mpr.krskstate.ru/dat/bin/art/45884_svodnij_doklad_2019.pdf) (accessed: 09.09.2022).

5. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory" for 2020. URL: <http://www.krsecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20-%202020.pdf> (accessed: 09.09.2022).

6. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory" for 2021. URL: <http://www.krsecology.ru/Data/Docs/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20-%202021.pdf> (accessed: 09.09.2022).

7. Rating of countries by the level of ecology. nonenews. URL: <https://nonews.co/directory/lists/countries/ecology> (accessed: 09.09.2022).

© Калекулин В. Б., Гудаева Е. А., 2022

УДК 504.3.054

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А. В. Котов<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 информационных и вычислительных технологий  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, проспект Мира, 53  
E-mail: Kotalekc200@mail.ru

*В статье рассматривается зависимость содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе от высоты на урбанизированных территориях г. Красноярск.*

*Ключевые слова: взвешенные вещества, загрязнение атмосферного воздуха.*

## VERTICAL DISTRIBUTION OF POLLUTION IN URBAN DEVELOPMENTS

A.V. Kotov<sup>1</sup>, O.V. Taseiko<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: Kotalekc200@mail.ru

*The article discusses the dependence of the content of suspended solids in the atmospheric air on the altitude in the urbanized areas of Krasnoyarsk.*

*Key words: suspended substances, air pollution.*

Состав атмосферного воздуха в значительной степени зависит от высоты и экологического состояния местности. Развитие промышленности и рост количества автомобильного транспорта приводит к постоянному повышению уровней загрязнения атмосферы города. Взвешенные вещества являются приоритетным загрязнителем, входящим в состав выбросов предприятий теплоэнергетики, машиностроительных производств, предприятий ракетно-космической отрасли и других.

На рассеивание загрязняющих веществ оказывают влияние как параметры источника выбросов, так и метеорологические параметры. В случае пылевого загрязнения для определения осаждения и отложения пыли необходимо знать диаметр ее частичек. Поскольку, чем выше источник выбросов (к примеру, дымовые трубы), тем ниже поверхностная концентрация, этот параметр тоже надо учитывать. Кроме того, концентрации зависят не только от общего количества выбросов, но и от его температуры и скорости. Если температура выпускаемого газа выше температуры окружающего воздуха, то это приводит к термической плавучести газа [1]. Скорость его испускания, которую можно рассчитать по внутреннему диаметру трубы и объему выпускаемого газа, вызывает динамическую плавучесть газа. Необходимо подчеркнуть, что термическая и динамическая плавучесть газа зависят не от массы конкретного загрязняющего вещества, а от общей массы газа. К метеорологическим параметрам, влияющим на рассеивание загрязняющего вещества, относятся скорость и направление ветра, а также вертикальная температурная стратификация. Концентрация загрязняющего вещества обратно пропорциональна скорости ветра. В основном это связано с высокой скоростью движения транспорта. Более того, с возрастанием скорости ветра растет и турбулентное смешивание. Поскольку так называемые инверсии (т.е. ситуации, когда температура возрастает с увеличением высоты) препятствуют турбулентному смешиванию, максимальные поверхностные концентрации наблюдаются при высокой стабильности стратификации [2].

В жилой застройке г. Красноярска проведены измерения концентраций взвешенных веществ на высоте первого и 25-го этажей. Измерения проводились в сентябре 2022 года в Советском районе, а именно на ул. Алексеева, дом 43 (25 этажей) и ул. 9 мая, дом 83 (25 этажей) в 9:00 и 21:00. Оба дома расположены на одной высоте и одинаково удалены от источников загрязнения, плотность и тип застройки схожи. Результаты измерений обоих домов показали, что концентрация взвешенных веществ на 25-ом этаже незначительно отличается результатов измерения на первом. Во время измерений наблюдался циклональный тип погоды. Для получения более полной картины вертикального распределения взвешенных частиц необходимо провести дальнейшие исследования, включая измерения в периоды НМУ.

Закрытые дворы и плотная застройка в совокупности ухудшают продуваемость застройки, вследствие все загрязняющие вещества, находящиеся внутри городских кварталов не выдуваются, а осаждаются и накапливаются. Для улучшения качества атмосферного воздуха необходимо не только регулировать объемы выбросов загрязняющих веществ, но и учитывать продуваемость застройки при проектировании новых жилых районов или уплотнении застройки в уже существующих.

### Библиографические ссылки

1. Загрязнение атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения: 09.09.2022).
2. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА: МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА В ВОЗДУХЕ [Электронный ресурс]. URL: <http://base.safework.ru/iloenc?print&nd=857100143&spack=110LogLength%3D0%26LogNumDoc%3D857000274%26listid%3D01000000100%26listpos%3D2%26lsz%3D11%26nd%3D857000274%26nh%3D1%26> (дата обращения: 09.09.2022).

### References

1. Outdoor air pollution. Available at: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed 09.09.2022).
2. AIR POLLUTION: MODELING THE DISPERSION OF A POLLUTANT IN THE AIR. Available at: <http://base.safework.ru/iloenc?print&nd=857100143&spack=110LogLength%3D0%26LogNumDoc%3D857000274%26listid%3D01000000100%26listpos%3D2%26lsz%3D11%26nd%3D857000274%26nh%3D1%26> (accessed 09.09.2022).

© Котов А. В, Тасейко О. В., 2022

УДК 622.276.72

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПРИ ДОБЫЧЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТОВАРНОЙ НЕФТИ

Н. В. Макара, С. В. Соболева, В. М. Воронин

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 рассмотрены причины аварийных разливов нефти и нефтепродуктов а также методы очистки почв.*

*Ключевые слова: нефтезагрязненные почвы, уровень загрязнения, методы очистки, метод микробиологической очистки.*

## INVESTIGATION OF SOIL CONTAMINATION DURING THE EXTRACTION AND TRANSPORTATION OF COMMERCIAL

N. V. Makar, S. V. Soboleva, V. M. Voronin

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 causes of emergency oil and petroleum product spills, as well as methods of soil purification.*

*Keywords: oil-contaminated soils, pollution level, purification methods, microbiological purification method.*

Одной из важнейших экологических проблем современности является загрязнение топливом, в том числе нефтепродуктами поверхности суши, возникающее в результате транспортировки и нефтедобычи, а также связанное с техногенными авариями при запуске космической техники. Такие загрязнения влияют на геологическую среду: наносят большой вред поверхностному слою почвы, поверхностным и грунтовыми водами. Нефтепродукты подвергают опасности здоровье людей и ставят под угрозу существование целых экосистем [1-3]. Определение уровня загрязнения почвы необходимо для решения вопроса о целесообразности проведения специальных работ по благоустройству почвы. Небезопасный уровень загрязнения почвы – это уровень, превышающий предел потенциала самоочищения. Аварийные выходы нефти и нефтепродуктов в окружающую среду связаны главным образом с увеличением числа чрезвычайных ситуаций, которое обусловлено ростом добычи нефти, износом основных производственных фондов (в частности, трубопроводного транспорта), а также диверсионными актами на объектах нефтяной отрасли. Причинами аварий, не связанных с диверсионными актами, являются в основном внутренние опасные факторы, обусловленные разгерметизацией и разрушением технических устройств, ошибки персонала, вызванные нарушением требований организации и производства опасных видов работ, организации работ по обслуживанию оборудования [4-5].

Данные по статистике аварий в нефтегазовом секторе даны в табл. 1.

Причины аварийных разливов нефти и нефтепродуктов распределяются по годам следующим образом.

2021: внутренние опасные факторы, связанные с разгерметизацией и разрушением технических устройств, -4; ошибки персонала, обусловленные нарушением требований организации и производства опасных видов работ, организации работ по обслуживанию оборудования, – 6.

2020: внутренние опасные факторы, связанные с разгерметизацией и разрушением технических устройств, – 10; ошибки персонала, вызванные нарушением требований организации и производства газоопасных, огневых и ремонтных видов работ, а также организации работ по обслуживанию оборудования, – 9.

2019: внутренние опасные факторы, связанные с разгерметизацией и разрушением технических устройств, – 10; ошибки персонала, обусловленные нарушением требований организации и производства опасных видов работ, организации работ по обслуживанию оборудования, – 8.

2017: внутренние опасные факторы, связанные с отказом и разгерметизацией технических устройств, нарушением технологии производства работ, – 14; ошибки персонала, обусловленные нарушением требований организации и производства опасных работ, – 4.

Таблица 1

**Аварии на объектах нефтегазового комплекса. Классификация по видам**

Вид аварии	Период				
	2017	2018	2019	2020	2021
Выброс горючих веществ, пожар	24	-	18	13	11
Разрушение сооружений	18	-	3	9	6
Повреждение, разрушение технических устройств	28	-	21	16	10
Неконтролируемый взрыв	13	-	12	5	5
Итого:	83	-	54	43	32
Экономический ущерб	1076,3	-	2571,4	6849,7	2626,76
Пострадавшие	17	-	33	30	49
Пострадавшие	12	-	16	6	8

Также распределение количества аварий по годам в зависимости от вида причины представлено в табл. 2.

Таблица 2

**Распределение причин аварийных разливов нефти и нефтепродуктов**

Причина	Число аварий в год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Внутренние опасные факторы, связанные с разгерметизацией и разрушением технических устройств	14	-	10	10	4
Ошибки персонала, вызванные нарушением требований организации и производства опасных видов работ, организации работ по обслуживанию оборудования	4	-	8	9	6

Под негативными экологическими изменениями в почвах в районе добычи и транспортировки нефти подразумеваются: нарушение экологического равновесия в почвенной экосистеме, гибель почвенной биоты, уменьшение продуктивности или гибель растений, изменение морфологии и водно-физических свойств почв, снижение плодородия. Большую опасность представляет собой загрязнение подземных и поверхностных вод в результате вымывания нефтепродуктов из почвы или грунта и их растворения в воде.

В настоящее время в России и других странах используются различные технологии для обезвреживания почвы, загрязненной нефтепродуктами. Наиболее часто используемые методы можно условно разделить на три группы: механическую, физико-химическую и биологическую [6].

Существует множество способов, направленных на устранение аварийных разливов нефти и нефтепродуктов и очистку загрязненной почвы. На сегодняшний день наиболее распространенным является метод микробиологической очистки, но он не идеален, кроме того, изучаются перспективные физико-химические методы очистки почвы.

Большинство методов имеют ограничения в применении, связанные с типом грунтов и пород, видом и интенсивностью загрязнений, температурными погодными условиями. Иные недостаточно эффективны или по сути представляет собой не очистку, а локализацию и консервирование загрязнений

(механические способы). Некоторые способы достаточно эффективны, но в результате их применения является изменение свойств и структуры пород. Вред, наносимый аварийными разливами нефтепродуктов, нельзя недооценивать. Каждый метод имеет свои особенности, в зависимости от которых определяется целесообразность применения того или иного метода в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

Были найдены современные экологически чистые методы с использованием нефтеокисляющих бактерий, способных разрушать нефтепродукты без ущерба для окружающей среды. Поэтому необходимо продолжать исследования и разрабатывать новые технологии, позволяющие в короткое время и без ущерба для окружающей среды ликвидировать последствия подобных аварий [7].

### Библиографические ссылки

1. Муравьева С.И., Казина Н.И., Прохорова Е.К. – Справочник по контролю вредных веществ в воздухе, М. Химия, 1988, с. 98-99.
2. Загрязнение почвы нефтепродуктами. oblasti-ekologii.ru: веб-сайт. URL: <https://oblasti-ekologii.ru/ecology/himicheskoe-zagryaznenie-pochvy/nefteproduktami>
3. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. gosnadzor.ru: веб-сайт. URL: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports)
4. Полякова, С. А. Анализ аварийности на объектах нефтегазовой отрасли России / С. А. Полякова, С. С. Ильичёв. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2022. № 16 (411). С. 115-117. URL: <https://moluch.ru/archive/411/90471/> (дата обращения: 28.07.2022).
5. Тучкова О.А., Гасилов В.С. Разливы нефти и нефтепродуктов. Ч. 1. Основные положения разработки Планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Вестник технологического университета, 2016, т. 19, № 21, с. 69–72.
6. Уровни загрязнения почв нефтепродуктами. helpiks.org: веб-сайт. URL: <https://helpiks.org/8-14314.html>
7. Ксенофонтов Б.С. Основы микробиологии и экологической биотехнологии. М., Форум, Инфра-М, 2019.

### References

1. Muravyeva S.I., Kazina N.I., Prokhorova E.K. Handbook on the control of harmful substances in the air, M. Chemistry, 1988, pp. 98-99.
2. Soil pollution with petroleum products. oblasti-ekologii.ru : website. URL: <https://oblasti-ekologii.ru/ecology/himicheskoe-zagryaznenie-pochvy/nefteproduktami>
3. Annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. gosnadzor.ru : website. URL: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports)
4. Polyakova, S. A. Accident analysis at the facilities of the oil and gas industry of Russia / S. A. Polyakova, S. S. Ilyichev. Text : direct // Young scientist. 2022. № 16 (411). Pp. 115-117. URL: <https://moluch.ru/archive/411/90471/> (date of reference: 07/28/2022).
5. Tuchkova O.A., Gasilov V.S. Oil and petroleum product spills. Part 1. The main provisions of the development of Plans for the prevention and elimination of oil and petroleum product spills. Bulletin of the Technological University, 2016, vol. 19, No. 21, pp. 69-72.
6. Levels of soil contamination with petroleum products. helpiks.org : website. URL: <https://helpiks.org/8-14314.html>
7. Ksenofontov B.S. Fundamentals of microbiology and environmental biotechnology. M., Forum, Infra-M, 2019. Pollution levels

© Макап Н. В., Соболева С. В., Воронин В. М., 2022

УДК 630.431.5

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА В УЧЕБНО-ОПЫТНОМ ЛЕСХОЗЕ СИБГУ ИМ. М. Ф. РЕШЕТНЕВА

А. В. Мачернис, О. К. Крылова, В. В. Кошевая

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

*Количество лесных пожаров в Красноярском крае превышает одну тысячу ежегодно. Лесные пожары вызывают экономический ущерб и загрязнение атмосферы продуктами горения. Загрязненный атмосферный воздух затрудняет эксплуатацию ракетно-космической техники в оптимальном режиме.*

*Ключевые слова: лесной пожар, вероятность, оценка, антропогенная нагрузка, молниевый разряд, безопасность, предупреждение, мониторинг.*

## FOREST FIRE PROBABILITY ASSESSMENT IN THE EDUCATIONAL AND EXPERIMENTAL LESKHOZ SIBGU IM. M. F. RESHETNEVA

A. V. Macharnis, O. K. Kryilova, V. V. Koshevaya

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

*The number of forest fires in the Krasnoyarsk Territory exceeds one thousand annually. Forest fires, cause economic damage and pollution of the atmosphere with combustion products. Polluted atmospheric air makes it difficult to operate rocket and space technology in optimal mode.*

*Keywords: forest fire, probability, assessment, anthropogenic load, lightning discharge, safety, warning, monitoring.*

Учебно-опытный лесхоз СибГУ им. М. Ф. Решетнева является некатегоризованным объектом по гражданской обороне и не относится к опасным производственным объектам. Но несмотря на это, существует риск возникновения как внутренних, так и внешних чрезвычайных ситуаций. Учебно-опытный лесхоз СибГУ им. М. Ф. Решетнева находится в лесном массиве и осуществляет свою деятельность по лесоводству и лесовосстановлению, поэтому наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией природного характера является лесной пожар. Лесные пожары наносят значительный экологический ущерб, основным является загрязнение атмосферы, которое создает дополнительные проблемы при эксплуатации ракетно-космической техники. Поскольку лес является главным поставщиком кислорода, после его уничтожения кислород не образуется, следовательно, не поглощается вредный для здоровья человека углекислый газ, который и загрязняет атмосферу. Снижается качество воздуха. Кроме того, дым и пыль от пожара вызывают сильный дискомфорт при дыхании и могут существенно сказаться на состоянии здоровья людей с аллергией и респираторными заболеваниями, в том числе, работников ракетно-космической отрасли промышленности [1, 2].

По данным КГАУ «Лесопожарный центр» статистика лесных пожаров в Красноярском крае представлена в табл. 1.

По данным из табл. 1 установлено, что с 2016 по 2019 год количество лесных пожаров в Красноярском крае возрастало ежегодно и составило максимальное количество в 2019 г. В 2020 и 2021 годах количество пожаров уменьшилось и составило 1188 и 1087 соответственно [3].

Для оценки вероятности возникновения пожара использовалась детерминированно-вероятностная методика Томского государственного университета, учитывающая помимо погодных условий влияние человека на возможность возгораний в лесу и вероятность воспламенения лесных горючих материалов вследствие природных явлений [4].

Таблица 1

## Статистика лесных пожаров в Красноярском крае

Год	Количество пожаров
2016	1408
2017	1664
2018	1600
2019	1993
2020	1188
2021	1087

Вероятность возникновения пожара определяется по формуле

$$P = [P(A) \cdot P(FF/A) + P(M) \cdot P(FF/M)] \cdot P(C), \quad (1)$$

где  $P(A)$  – вероятность антропогенной нагрузки;  $P(FF/A)$  – вероятность возникновения пожара от антропогенной нагрузки;  $P(M)$  – вероятность молниевых разрядов;  $P(FF/M)$  – вероятность возникновения пожара от молниевых разрядов.

Вероятность антропогенной нагрузки:

$$P(A) = N_a / N_{пс}, \quad (2)$$

где  $N_a$  – число дней в периоде с антропогенной нагрузкой;  $N_{пс}$  – общее число дней в периоде пожароопасного сезона (ПС)

$$P(A) = 104 / 150 = 0,69$$

Вероятность возникновения пожара от антропогенной нагрузки определяется по формуле:

$$P(FF/A) = N_{па} / N_{кп}, \quad (3)$$

где  $N_{па}$  – число пожаров от антропогенной нагрузки;  $N_{кп}$  – общее число пожаров в периоде.

$$P(FF/A) = 860 / 1088 = 0,79$$

Вероятность молниевых разрядов:

$$P(M) = N_m / N_{пс}, \quad (4)$$

где  $N_m$  – число дней с молниевыми разрядами.

$$P(M) = 15 / 150 = 0,1$$

Вероятность возникновения пожара от молниевых разрядов определяется по формуле:

$$P(FF/M) = N_{пм} / N_{кп}, \quad (5)$$

где  $N_{пм}$  – число пожаров от молниевых разрядов.

$$P_{ij}(FF/M) = 228 / 1080 = 0,21$$

Вероятность возникновения пожара по метеоусловиям:

$$P(C) \approx \text{ИПО}_{\text{текущий}} / \text{ИПО}_{\text{критический}}, \quad (6)$$

где  $\text{ИПО}_{\text{текущий}}$  – значения индекса пожарной опасности в каждый день пожароопасного сезона;  $\text{ИПО}_{\text{критический}}$  – значение ИПО, начиная с которого возможно возникновение пожара.

$$P(C) \approx 500 / 1000 = 0,5$$

$$P = [0,69 \cdot 0,79 + 0,1 \cdot 0,21] \cdot 0,5 = 0,3$$

По результатам расчета, вероятность возникновения лесного пожара за год составляет 0,3.

Результат расчета вероятности возникновения лесных пожаров свидетельствует о существенной реализации возникновения лесного пожара в учебно-опытном лесхозе СибГУ им. М.Ф. Решетнева и необходимости поиска направлений решения этой проблемы [5].

### Библиографические ссылки

1. Акимов В. А. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера : Учеб. пособие / В.А. Акимов, М.И. Фалеев и др. М.: Высш. шк., 2006 592 с. Текст : непосредственный.
2. Федеральное агентство лесного хозяйства : официальный сайт. Москва Обновляется в течение суток. URL: [https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest\\_security\\_and\\_protection](https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest_security_and_protection) (дата обращения: 08.04.2022). Текст : электронный. 19
3. КГАУ «Лесопожарный центр» : официальный сайт. Красноярск Обновляется в течение суток. URL: [http://lpcentr.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=100&Itemid=84#](http://lpcentr.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=100&Itemid=84#) (дата обращения: 08.04.2022). Текст : электронный.
4. Гришин А.М., Фильков А.И. Детерминированно-вероятностная модель прогноза лесной пожарной опасности с использованием геоинформационной системы Arc View // Материалы международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». Томск: Изд-во Томского университета, 2002. С. 62 63.
5. Положение "Об отделе мобилизационной подготовки, гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций, пожарной безопасности и антитеррористической защищенности" ПСП МГЧП-2021 : утвержден и введен в действие от 10.02.2021 приказом ректора СибГУ им. М.Ф. Решетнева №157 от 10.02.2021 года. Текст : непосредственный.

### References

1. Akimov V. A. Life safety. Safety in emergency situations of natural and man-made nature: Proc. allowance / V.A. Akimov, M.I. Faleev and others M. : Vyssh. school, 2006 592 p. Text : direct.
2. Federal Forestry Agency: official site. Moscow Updated during the day. URL: [https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest\\_security\\_and\\_protection](https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest_security_and_protection) (date of access: 04/08/2022). Text : electronic. 19
3. KSAU "Forest Fire Center": official site. Krasnoyarsk Updated during the day. URL: [http://lpcentr.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=100&Itemid=84#](http://lpcentr.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=100&Itemid=84#) (date of access: 04/08/2022). Text : electronic.
4. Grishin A.M., Filkov A.I. Deterministic-probabilistic model of forecasting forest fire hazard using Arc View geoinformation system // Proceedings of the international conference "Associated Problems of Mechanics, Informatics and Ecology". Tomsk: Publishing House of Tomsk University, 2002. S. 62 63.
5. Regulations "On the department of mobilization training, civil defense, emergency situations, fire safety and anti-terrorist security" PSP MGChP-2021: approved and put into effect on 10.02.2021 by order of the rector of SibGU named after. M.F. Reshetnev No. 157 dated February 10, 2021. Text : direct.

© Мачернис А. В., Крылова О. К., Кошечая В. В., 2022

УДК 504.14

## БИОНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ УРБАНИЗИРОВАННОГО ЛАНДШАФТА

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

*Показана роль процедуры оценки бионических показателей в динамике для формирования экологически благоприятной среды урбанизированных территорий.*

*Ключевые слова: бионические показатели, урбанизированные территории, природно-технические системы*

## BIONIC INDICATORS OF PLANTS OF AN URBANIZED LANDSCAPE

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 role of procedure of evaluation of bionic indicators in dynamics for formation of ecologically favorable environment of urbanized territories is shown.*

*Keywords: bionic indices, urbanized territories, natural and technical systems.*

Главное жизнеобеспечивающее условие существования человека на Земле – гармоничные отношения с природой.

Высокие темпы урбанизации и особенности организации современных городов диктуют свои условия жизни, создают экологические, медицинские, социальные и психологические проблемы жителя городской среды [1].

В связи с этим, задача гармонизации жизненной среды максимально экологическими, приближенными к природным механизмам очищения способами ждёт своего решения.

Одно из направлений экологического развития городов – использование фитотехнологий, включающих такие направления, как фитоэргономика, диетология, фитодизайн, фитоионизация и другие.

Эти технологии способны адаптировать антропогенную среду мегаполиса к природной путём использования естественных механизмов фитоаэрации, очищения и ионизации живыми растениями.

При этом растения, будучи включёнными в природно-техническую (инженерную систему) систему, являются частью бионических систем, которые стимулируют проявление растениями желательных для человека свойств, улучшая качество и продолжительность его жизни [2].

Известно, что растительные насаждения играют важную роль в поддержании химического (газового), состава воздуха, его физического состояния, уменьшение содержания вредных примесей и общее увеличение качества воздушной среды.

Технологии с использованием природно-технических систем приобретают все большее распространение и применение на практике.

Природно-технические системы при этом могут быть представлены для открытых и полуоткрытых урбанизированных пространств в виде:

вертикально ориентированных садов;

озеленения полуоткрытых городских ландшафтов с использованием инженерных методов;

озеленения пагод, крыш зданий, автотранспорта.

Для закрытых пространств:

применение различных инженерных методов с использованием комнатных растений – медико-экологический фитодизайн;

использование различных инновационных материалов из растительного сырья с полезными свойствами;

использование вертикальных фитомодулей закрытых пространств с использованием инженерных методов и другие [3, 4].

Для минимизации дискомфорта влияния техносферы на живые организмы с помощью природных механизмов искусственно созданных систем можно применить принципы бионики – прикладной науки о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы.

На принципах бионики основана работа природно-технических систем.

Бионические (природно-технические) системы в закрытых урбанизированных пространствах включают как технические средства улучшения качества воздуха, так и натуральные, природные компоненты, деликатно воздействующие на человека и окружающую среду.

В открытых пространствах эти системы представляют природно-технические системы как совокупность природных, природно-техногенных и техногенных объектов, взаимозависимых и взаимообусловленных.

Таким образом, показатели (параметры) желательных, полезных для человека свойств растений, искусственно стимулируемых инженерными методами, способных положительно влиять на техногенную среду, можно назвать бионическими.

Тогда в качестве бионических показателей растений природно-технических систем открытых и закрытых пространств урбанизированных территорий можно выделить наиболее значимые свойства и функции растений:

фитонцидная активность;

оптимизация газового и химического состава воздуха;

нормализация физического состава воздуха (ионизация воздуха);

снижение шумовой нагрузки; снижение ветровой нагрузки;

формирование микроклимата городов;

эргономические свойства;

эстетические и органолептические характеристики [5-7].

На наш взгляд, современные тенденции в проектировании, архитектуре и строительстве (в том числе ландшафтном) городов, помещений различного назначения требуют включения в проекты бионических систем с показателями, способствующими формированию городской среды высокого качества.

О перспективах развития бионических методов в урбанизированных зонах, способствующих формированию экологического мышления в экологически благоприятной среде, об их практическом воплощении в повседневную жизнь задуматься необходимо уже сейчас.

С этой целью в программы вузовской подготовки архитектурных и строительных направлений необходимо включать соответствующие дисциплины.

Оценка бионических показателей растений, активное их использование в бионических системах позволит существенно улучшить качество и увеличить продолжительность жизни современного горожанина.

### Библиографические ссылки

1. НИА «Экология» [Электронный ресурс]. URL:<https://nia.eco/2022/04/11/34275> /(дата обращения 12.09.2022).

2. Бакутис В. Э. Инженерное благоустройство городских территорий / В. Э. Бакутис, В. А. Бутягин, Л. Б. Лунц. М.: Стройиздат, 1971. 224 с.

3. Тимофеева С. С. Современные фитотехнологии очистки воздуха. Часть 1. Технологии очистки воздуха закрытых помещений: медико-экологический фитодизайн / С. С. Тимофеева // XXI век. Техносферная безопасность. Т. 2. № 1. С. 70–85.

4. Жученко А. А. Жученко А. А., Труханов А. И. Средаулучшающие фитотехнологии в северных мегаполисах. М: КРАСАНД, 2009. 192 с.

5. Сидоренко В. Ф. Теоретические и методологические основы экологического строительства. Волгоград: ВолГАСА, 2000. 200 с.

6. Фоков Р. И. Экологическая реконструкция и оздоровление урбанизированной среды. М.: Изд-во АСВ, 2012. 304 с.

7. Саулова Т. А., Ефремова И. С. Инструменты для регулирования шумовых нагрузок от автомобильного городского транспорта: Нидерланды «Transportation Research Procedia»: изд. Elsevier, 2021. Том 61. С. 518-525.

### References

1. *NIA Ekologiya* [NIA Ecology]. Available at: <https://nia.eco/2022/04/11/34275> (accessed 10.09.2022).

2. Bakutis V. E. *Inzhenernoe blagoustroystvo gorodskikh territoriy* [Engineering landscaping of urban areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 224 p.

3. Timofeeva S. S. [Modern phytotechnology for air purification. Part 1. Indoor air purification technologies: medical and ecological phytodesign]. // *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'*. vol. 2. no.1. P. 70–85. (In Russ.).

4. Zhuchenko A. A. *Sredouluchshayushchie fitotekhnologii v severnykh megapolisakh* [Mediating phytotechnologies in northern metropolitan areas]. Moscow, KRASAND Publ., 2009, 192 p.

5. Sidorenko, V. F. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ekologicheskogo stroitel'stva* [Theoretical and methodological foundations of ecological construction]. Volgograd, VolGASA Publ., 2000. 200 p.

6. Fokov, R. I. *Ekologicheskaya rekonstruktsiya i ozdorovlenie urbanizirovannoy sredy* [Ecological reconstruction and rehabilitation of the urban environment]. Moscow, Izd-vo ASV Publ., 2012. 304 p.

7. Saulova T. A., Efremova I. S. [Instruments for regulating noise loads from urban road transport]. Niderlandy «Transportation Research Procedia». Elsevier Publ., 2021. vol. 61. P. 518-525 p.

© Саулова Т. А., 2022

УДК 613.6

## АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ

Т. А. Саулова, И. А. Зайцева

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

*Сделан анализ методик оценки профессиональных рисков в ракетно-космической отрасли, определяемых законодательно. Обсуждены критерии выбора методик с точки зрения их применимости к условиям и целям оценки.*

*Ключевые слова: профессиональный риск, методика оценки, критерии выбора.*

## ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING OCCUPATIONAL RISKS

T. A. Saulova, I. A. Zaitseva

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

*An analysis is made of the methods for assessing occupational risks in the rocket and space industry defined by law. The criteria for selecting methodologies in terms of their applicability to the conditions and objectives of the assessment are discussed.*

*Keywords: professional risk, assessment technique, selection criteria.*

**Актуальность.** Снижение уровня профессионального риска является актуальной важнейшей гуманитарной, социальной, экономической и общественной задачей системы управления охраной труда на всех уровнях ракетно-космической отрасли.

Оценка профессиональных рисков (ОПР) и информирование работников о проведенных мероприятиях, обеспечивающих защиту от воздействия производственных факторов, о компенсациях и гарантиях, которые назначены ему за работу во вредных условиях – это обязанность каждого работодателя, которая закреплена в трудовом законодательстве в статье 212 ТК РФ [1].

**Цель работы** заключалась в попытке разобраться в большом количестве известных методик ОПР и определить обоснованные критерии выбора эффективной методики с учётом условий и целей оценки.

**Содержание работы.** Сделан анализ существующей нормативной документации и тридцати научных аналитических и практических работ, посвящённых обсуждению применимости методик ОПР.

**Выводы.** На основании информации, изложенной в приказе Минтруда № 926 можно сделать вывод, что наиболее применяемыми методиками ОПР являются «Контрольные листы» и «Матричный метод на основе балльной оценки», в связи с тем, что они универсальны и отличаются простотой процедуры оценки, могут применяться для организации в целом или структурного подразделения, а также на уровне конкретного производственного процесса или оборудования [2]. Методики предполагают исключение значительных временных и финансовых затрат, связанных с обучением экспертов.

В ГОСТ Р 58771–2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» дано описание методов оценки профессиональных рисков, не указанных в приказе Минтруда № 926. По мнению Тимофеевой С. С. одним из положительно зарекомендовавших себя на практике является «метод Файна–Кинна» [3]. К плюсам метода можно отнести: простоту расчетов степени риска, наглядность итоговых ре-

зультатов, к минусам – субъективность оценки специалиста, проводящего анализ. При ОНР «матричным методом» структура риска включает два основных элемента, которые являются общими для всех видов опасностей: тяжесть последствий и вероятность – качественную характеристику возможной частоты событий. К преимуществам «матричного метода» авторы относят простоту использования метода, а к недостаткам – высокую субъективность оценки [4].

Макаров П. В. приводит анализ метода количественной оценки риска по системе «Элмери», а также косвенные методы оценки [5]. Метод по системе «Элмери» основан на наблюдениях. С помощью которого можно прогнозировать с высокой точностью уровень травматизма на предприятии, выявить потенциальные причины травм и разработать целесообразные направления улучшения условий труда. «Косвенные методы» оценки рисков для здоровья и жизни работников используют показатели, характеризующие отклонение существующих параметров от норм и имеющие причинно-следственную связь с рисками: отклонение значений производственных факторов от предельно допустимых значений; отношение не выполненных на рабочем месте нормативных требований охраны труда к их общему количеству и т.д. По мнению Коробова А. В., Гориной Л. Н., метод «Элмери» показывает, сколько процентов от всех действующих на рабочем месте производственных факторов соответствуют нормам. Они отмечают простоту метода как преимущество и отсутствие ранжирования опасностей как недостаток [4, 5].

Суть «метода оценки рисков на основе оценки степени выполнения требований безопасности» заключается в последовательной проверке на соответствие всем государственным требованиям в области промышленной, пожарной безопасности и охраны труда. Преимущества метода – простота в применении, эффективность на начальных стадиях эксплуатации объекта. При этом не учитываются опасности, для которых нет требований в нормативных документах и метод не дает количественной оценки уровня риска [4, 5].

Анализ «галстук–бабочка» следует применять в ситуации, когда сложно провести полный анализ дерева неисправностей. Анализ «галстук–бабочка» может быть полезен для обмена информацией при использовании более сложных методов [4, 5].

**Результаты. Критерии выбора методик ОНР.** В результате анализа рекомендаций, изложенных в официальных документах и анализа мнений учёных для сравнительного анализа методик были определены критерии выбора предпочтений в пользу методов ОНР:

- простота проведения оценки риска предложенным методом;
- минимизация необходимых затрат ресурсов для проведения оценки риска;
- универсальность использования (любой процесс, любой размер предприятия);
- возможность получения количественных данных на выходе;
- простота интерпретации результатов оценки;
- возможность упорядочивать риски.

**Обоснование выбора методик ОНР.** На основании сравнительного анализа по выбранным критериям, можно сделать вывод, что наиболее простыми по проведению ОНР являются методы: «контрольные листы», «метод анализа дерева решений», «метод SWIFT». Методами, требующими большой интеллектуальной напряжённости проведения оценки, являются: «матричный метод на основе экспертных заключений», «матричный метод на основе балльной оценки», «метод анализа причинно-следственных связей», «метод анализа сценариев», «метод HAZOP», «метод технического обслуживания, направленный на обеспечение надежности», «метод «Дельфи», «метод Файна–Кинна», «метод по системе «Элмери».

Сложность проведения оценки (затраты времени на расчёты и финансирование привлечённых специалистов) характерна для таких методов, как метод «галстук–бабочка», «метод анализа уровней защиты», «метод технического обслуживания, направленный на обеспечение надежности», «синдиктический подход», «косвенные методы оценки». При этом не все перечисленные методы способны дать наглядные результаты, которые были бы понятны для сотрудников. К преимуществам этих методов можно отнести применение для оценки различных типов рисков, возможность выявления причин повышенного риска.

Таким образом, в ходе сравнительного анализа критериев методик ОНР выявили, что наиболее удобными и универсальными методами являются «матричный метод на основе балльной оценки» и «метод Файна–Кинна». При использовании методов результаты могут быть представлены в понятной работникам наглядной форме.

### Библиографические ссылки

1. Трудовой Кодекс Российской Федерации от 26.12.2001 г. [Электронный ресурс]. URL:[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34683/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/) (дата обращения 10.09.2022).
2. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации № 926 «Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков»: дата введения 28.12.2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-mintruda-rossii-ot-28122021-n-926/rekomendatsii-po-vyboru-metodov-otsenki/> (дата обращения 10.09.2022).
3. ГОСТ Р 58771–2019 Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Технологии оценки риска: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2019 г. № 1405–ст. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (дата обращения 10.09.2022).
4. Тимофеева С. С. Методы и технологии оценки производственных рисков. Иркутск.: ИрГТУ, 2014. 177 с.
5. Макаров П. В. Профессиональные риски. Нижний Новгород.: ННГАСУ, 2018. 144 с.

### References

1. *Trudovoy Kodeks Rossiyskoy Federatsii*. [Labor Code of the Russian Federation]. 26.12.2001. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34683/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/) (accessed 10.09.2022).
2. *Prikaz Ministerstva truda i sotsial'noy zashchity Rossiyskoy federatsii № 926 Ob utverzhdenii Rekomendatsiy po vyboru metodov otsenki urovney professional'nykh riskov i po snizheniyu urovney takikh riskov* [On approval of the Recommendations on the selection of methods to assess levels of occupational risks and to reduce the levels of such risks]. 28.12.2021. Available at: <https://sudact.ru/law/prikaz-mintruda-rossii-ot-28122021-n-926/rekomendatsii-po-vyboru-metodov-otsenki/> (accessed 10.09.2022).
3. *GOST R 58771–2019 Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska* [Risk management. Risk assessment technologies]. 17.12.2019. no. 1405–st. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (accessed 10.09.2022).
4. *Timofeeva S. S. Metody i tekhnologii otsenki proizvodstvennykh riskov* [Methods and technologies for assessing production risks]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2014. 177 p.
5. *Makarov P. V. Professional'nye riski* [Professional risks]. Nizhny Novgorod, NNGASU Publ., 2018. 144 p.

© Саулова Т. А., Зайцева И. А., 2022

УДК 630.432

## ВНЕДРЕНИЕ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ТЕХНОЛОГИИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

А. Ю. Тимошева\*, 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: timosheva03@mail.ru

*Предложен вариант совместного использования ГИС и роя беспилотных летательных аппаратов для повышения эффективности спутникового мониторинга очагов возгорания в лесах*

*Ключевые слова: лесной пожар, спутниковый мониторинг, роевой интеллект, метод роя частиц, беспилотные летательные аппараты.*

## THE IMPLEMENTATION OF A SWARM OF DRONES IN A SATELLITE-BASED MONITORING OF FOREST FIRES

A. Yu. Timosheva\*, E. N. Belskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: timosheva03@mail.ru

*This article presents the way of collaborative use of GIS and a swarm of drones for the enhancement of efficiency of satellite-based monitoring of forest fire outbreaks.*

*Keywords: forest fire, satellite-based monitoring, swarm intelligence, particle swarm method, unmanned aerial vehicles.*

**Введение.** Лесной пожар – бедствие, наносящее неисчислимы материальные, моральные и экологические потери. Ускоренное реагирование на пожарную ситуацию является залогом быстрого тушения пожара и ликвидации его последствий. Среди технологий мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС) выделяют визуальное обнаружение очагов возгорания людьми с вышек, мониторинг с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и спутниковый мониторинг [1]. Благодаря возможности охвата больших территорий, автоматизации процесса получения данных и высокой скорости передачи информации, широкое использование получила геоинформационная система (ГИС) мониторинга лесных пожаров. ГИС была создана в 1996 году и с этого времени постоянно развивается. С её помощью осуществляется информационная поддержка наземных служб. Для функционирования ГИС необходимы изначальные картографические данные местности и данные о местонахождении особых объектов (населенных пунктов, водоёмов, транспортных путей и др.) [2]. Далее характеристики местности из базы данных ГИС сравниваются со снимками земной поверхности в диапазоне инфракрасного излучения, переданными на наземную станцию со спутников. Разность температур создаёт блики на снимках, которые при сопоставлении с картой местности определяются как очаги возгорания [1]. Однако стоит отметить, что на качество снимков сильно влияют погодные условия. Также возникают трудности при обнаружении пожаров на ранней стадии. Решить данные проблемы можно путём совместного использования ГИС и БПЛА.

**Использование БПЛА в деятельности МЧС.** При борьбе с лесными пожарами в работе БПЛА обычно выделяют 3 стадии: предотвращение, обнаружение (наблюдение) и ликвидация, причём на стадии обнаружения их использование наиболее эффективно.

Поскольку лес постоянно меняется, а информация об особенностях почвенного покрова в базе данных ГИС не содержится, предлагается двухэтапный мониторинг местности. Первый этап включает в себя получение и анализ снимков с космических аппаратов. На втором этапе территории, отме-

ченные на спутниковых снимках как потенциально опасные, проверяются с помощью БПЛА. Такой подход позволяет точно оценить масштабы пожара, степень поражения территории, а значит рассчитать силы и средства, необходимые для ликвидации очагов возгорания. Двухэтапный мониторинг особенно важно осуществлять в местах, где изображение со спутника может быть засвечено, а также в местности, которая в последнее время уже была поражена огнём, поскольку из-за сухостоя пожары могут повториться.

**Роевой интеллект.** Роевой интеллект – это коллективное поведение естественных или искусственных систем [3]. В теории искусственного интеллекта он применяется в качестве метода оптимизации. Термин «роевой интеллект» ввели Херардо Бени и Ван Цзин в 1989 году. Существует множество алгоритмов движения систем, основанных на разных моделях поведения [4]. Задачу мониторинга лесных пожаров наиболее эффективно решать, используя алгоритм роя частиц. С математической точки зрения данный метод путём корректировки скорости и координаты каждой из частиц позволяет за определённое количество итераций определить глобальный максимум функции, а также несколько локальных экстремумов.

Рассмотрим принцип работы роя БПЛА в задаче двухэтапного мониторинга лесных пожаров. По космическому снимку определяются приблизительные координаты местности, поражённой огнём. Следующим этапом с ближайшей к исследуемой территории базы осуществляется запуск БПЛА основного состава, оснащённых ИФ-датчиками. Датчики одновременно считывают температуру в точках, где находятся БПЛА, затем среди всех значений выбирается несколько наиболее высоких температур и каждый дрон корректирует свои координаты и скорость таким образом, чтобы оказаться как можно ближе к одной из точек с повышенной температурой. В итоге БПЛА фиксируют своё положение над территорией пожара, как показано на рис. 1.

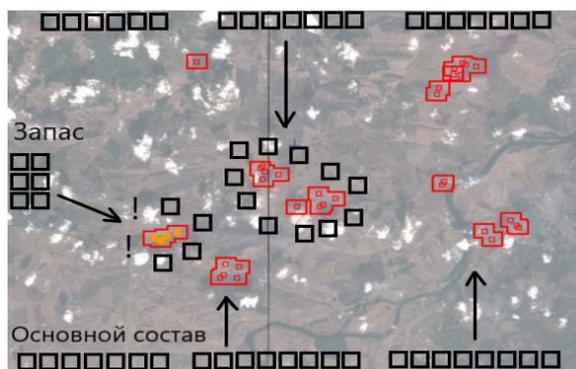


Рис. 1. Схематичное представление работы роя БПЛА [4]

На дронах, которые приблизились к максимальным температурам, включается камера для того, чтобы оператор имел возможность отслеживать работу роя. Для полного окружения очага возгорания, БПЛА при помощи ультразвуковых датчиков проверяют, находится ли в радиусе действия другой аппарат. В случае нехватки дронов поступает сигнал в запас, где незадействованные БПЛА получают начальные координаты и отправляются на место. Работа роя завершается либо оператором, если полученных данных достаточно для оценки ситуации, либо автоматически, если все рабочие дроны зафиксировали своё положение и не дают сигнала в запас.

В табл. 1 отражены преимущества и недостатки внедрения роя БПЛА в спутниковый мониторинг лесных пожаров [5].

Таблица 1

**Преимущества и недостатки совместного использования БПЛА и ГИС**

+ Эффективность мониторинга как больших, так и малых территорий	- Высокая стоимость создания роя БПЛА
+ Снижение зависимости от времени пролёта спутников по орбите	- Риски и ограничения, связанные с эксплуатацией дронов (высокие температуры, время эксплуатации, высота полёта)

Таким образом, двухэтапный мониторинг, основанный на совместном использовании спутниковых систем и роя БПЛА, способствует своевременному обнаружению очагов возгорания лесных по-

жаров и гарантирует точность полученных данных, что способствует максимально быстрому выбору оптимального способа тушения пожара.

### Библиографические ссылки

1. Лесной дозор [Электронный ресурс]. URL: <http://lesdozor.ru/lesnyie-pozharyi/analitika/tehnologii-monitoringa-lesa/> (дата обращения: 26.8.2022)
2. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы / Абушенко Н.А., Алтынцев Д.А., Антонов В.Н. и др. // Экология (70) / под ред. В. В. Белова ; Новосибирск, 2003. 135 с.
3. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Использование роевого интеллекта в решении NP трудных задач. Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №2 7 (120). С. 30-37
4. Тимошева А.Ю., Бельская Е.Н. Обнаружение и ликвидация очагов возгорания лесных пожаров с помощью роя беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : материалы IV Междунар. науч. конф. (22 апреля 2022, г. Железногорск), ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, 2022. С. 31-37
5. Ковалев Н.А., Масляков В.Н. Методика применения БПЛА для проведения лесопатологического обследования, 2010. 29 с.

### References

1. *Lesnoy dozor*. Available at: <http://lesdozor.ru/lesnyie-pozharyi/analitika/tehnologii-monitoringa-lesa/> (accessed: 26.8.2022)
2. Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Antonov V.N. [Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia. Results. Problems. Perspectives]. *Ekologiya* [Ecology] (70). Novosibirsk, 2003. 135 p. (In Russ.)
3. Kureychik V. M., Kazharov A. A. [A swarm intelligence utilization for solving the NP-challenging tasks]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [YuFU's News. Engineering sciences]. 2011, no. 2 7, p. 30-37. (In Russ)
4. Timosheva A.Yu., Belskaya E.N. [Detection and suppression of forest fire outbreaks via a swarm of drones]. *Materialy IV Mezhdunar. nauch. konf. "Aktualnye problemy obespecheniya pozharной bezopasnosti i zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy"* [Materials IV Intern. Scientific. Conf "Current topics of fire safety and emergency protection"]. Zheleznogorsk, 2022, p. 31-37. (In Russ.)
5. Kovalev N.A., Maslyakov V.N. [Methods of using UAVs for forest pathology examination], 2010, p. 29. (In Russ.)

© Тимошева А. Ю., Бельская Е. Н., 2022

УДК 331.45

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

А. Е. Ткачёва\*, В. О. Потапова, А. С. Щербина, Е. В. Щербина, 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: tkacheva\_nastya99@mail.ru

*Анализируются требования к метрологическому обеспечению при специальной оценке условий труда как основа безопасности труда.*

*Ключевые слова: специальная оценка условий труда, метрологическое обеспечение,*

## METROLOGICAL SUPPORT IN THE FIELD OF OCCUPATIONAL SAFETY

A. E. Tkacheva\*, V. O. Potapova, A. S. Shcherbina, E. V. Shcherbina, E. A. Zhirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tkacheva\_nastya99@mail.ru

*The requirements for metrological support for a special assessment of working conditions as a method of improving activities are analyzed.*

*Keywords: special assessment of working conditions, metrological support.*

В настоящее время безопасность труда обеспечивается путем специальной оценки условий труда. Целью работы является анализ метрологического обеспечения в области специальной оценки условий труда в любых производственных сферах, в том числе в ракетно-космической деятельности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить цель специальной оценки условий труда и ее назначение.
2. Проанализировать вредные и опасные производственные факторы, влияющие на человека на основе метода причинно-следственного анализа диаграммы Исикавы.
3. Изучить нормативно правовые требования к метрологическому обеспечению безопасности труда.

Специальная оценка условий труда является мероприятием по идентификации вредных и опасных факторов производственной среды и трудового процесса и оценке уровня их воздействия на работника.

Целью специальной оценки условий труда является обеспечение безопасности и комфорта персонала на рабочем месте, а также определение гарантий и компенсаций, предоставляемых работникам за вредные или опасные условия труда [1].

В ходе исследования были проанализированы вредные и опасные производственные факторы, влияющие на человека. Содержание каждого производственного фактора представлено на причинно-следственной диаграмме Исикавы (рис. 1) [2].

Во время проведения специальной оценки условий труда, для получения достоверной информации необходимо проводить измерения в соответствии с установленными нормативно правовыми требованиями, а именно ГОСТ 12.0.005–2014 «Система стандартов безопасности труда. Метрологическое обеспечение в области безопасности труда».

Метрологическое обеспечение в области безопасности труда осуществляется при определении изменений в параметрах вредных и опасных производственных факторов и оценке соответствия условий труда установленным требованиям.

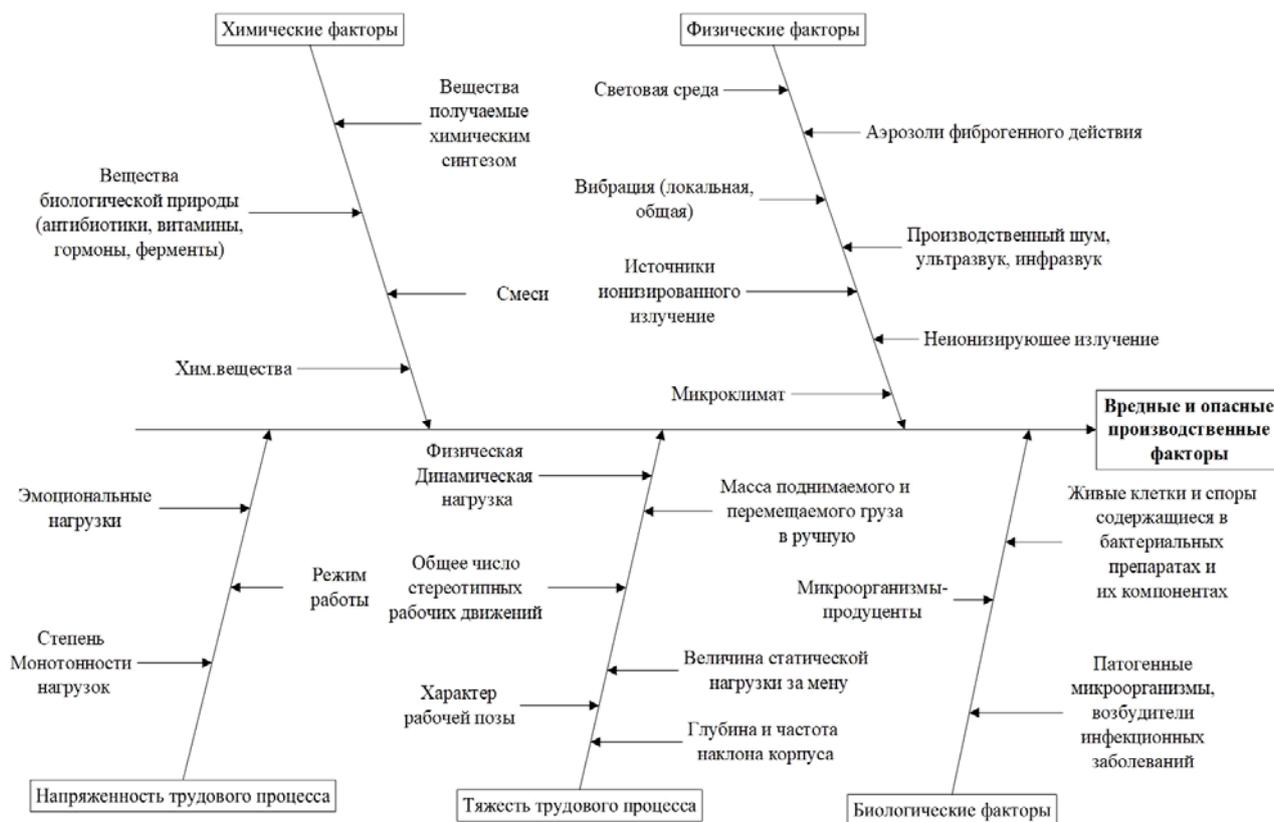


Рис. 1. Диаграмма Исикавы

С помощью метрологического обеспечения в области безопасности труда можно эффективно вести производственные процессы при соблюдении требований безопасности, достоверно контролировать состояние условий труда, исключать или сводить к допустимому уровню риск принятия ошибочного решения о соблюдении установленных требований к условиям труда [3].

Во время проведения исследований и измерений вредных и опасных производственных факторов должны применяться утвержденные и аттестованные методики измерений и соответствующие им средства измерений, прошедшие поверку и внесенные в Федеральный информационный фонд.

Одно из частых воздействий на сотрудника – это физический фактор, который связан в первую очередь с их непосредственным влиянием на человеческий организм. В эту категорию входят следующие измеряемые показатели, табл. 1:

Таблица 1

#### Измеряемые физические факторы

Измеряемый параметр	Диапазон измерений, единица величины	Предельно допустимая погрешность
Температура	от -30 °С до +50 °С	±0,2 °С
Производственный шум, ультразвук, инфразвук	25–140 дБ	±1 дБ
Освещенность	1–20000 лк	±10 %

Один из важных измеряемых параметров микроклимата является температура. При выборе средства измерения необходимо опираться на предел допускаемой абсолютной погрешности измерений ±0,2 °С. Данному требованию соответствует «Метеоскоп-М». Прибор, с помощью которого можно производить одновременный контроль до 8 параметров окружающей среды: температура воздуха; относительная влажность; атмосферное давление; скорость воздушного потока; результирующая

температура; средняя температура поверхностей и ограждающих конструкций; индекс тепловой нагрузки среды [5].

Таким образом, с помощью метрологического обеспечения в области безопасности труда разрабатываются и реализуются оптимальные принципы управления деятельностью по обеспечению единства и требуемой точности измерений в области безопасности труда, в том числе при осуществлении контроля состояния условий труда. Каждое рабочее место должно проходить комплексную оценку в соответствии с эргономическими, гигиеническими и техническими нормативами, а также другими требованиями, связанными с охраной труда.

#### Библиографические ссылки

1. Российская Федерация. Законы. О специальной оценке условий труда: федер. закон от 23 декабря 2013 г., № 426-ФЗ. М.: Кремль: 2013. 31 с.
2. Ткачева А.Е., Жирнова Е.А., Снежко А.А. Идентификация вредных и опасных факторов при специальной оценке условий труда // Актуальные вопросы естествознания: материалы: Седьмой Всерос. конф., 31 марта 2022 г., Иваново, 2022. С. 443-447
3. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: федер. закон от 11 июня 2013 г., № 102-ФЗ. М.: Кремль: 2008. 19 с.
4. ГОСТ 12.0.005–2014 Система стандартов безопасности труда. Метрологическое обеспечение в области безопасности труда. М: Стандартинформ, 2014. 21 с.
5. Метеоскоп-М Измеритель параметров микроклимата [Электронный ресурс]. URL: <https://ntm.ru/products/70/7774> (дата обращения: 02.09.2022).

#### References

1. RF Federal Law « About the special assessment of working conditions» of December 23, 2013 №426 (In Russ.).
2. Tkacheva A.E., Zhirnova E. A., Snezhko A. A. [Identification of harmful and dangerous factors with a special assessment of working conditions]. *Aktual'nyye voprosy yestestvoznaniya*. 2022, P. 443–447 (In Russ.).
3. RF Federal Law « On ensuring the uniformity of measurements » of June 11, 2013 №102 (In Russ.).
4. *GOST 12.0.005 2014 Sistema standartov bezopasnosti truda. Metrologicheskoye obespecheniye v oblasti bezopasnosti truda*. [State Standard 12.0.005 2014. System of labor safety standards. Metrological support in the field of labor safety]. Moscow, Standartinform Publ., 2014.-21с.
4. *Meteoroscope-M Meter of microclimate parameters*. [Brainstorming method and its modifications] (In Russ.). Available at: <https://ntm.ru/products/70/7774> (accessed 02.09.2022).

© Ткачева А. Е., Потапова В. О., Щербина А. С., Щербина Е. В., Жирнова Е. А., 2022

УДК 67.08:661.18.05

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНОГО РЕСУРСА

Н. Г. Черкасова, Л. Е. Черкасов

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 представленном материале приводятся результаты исследования возможности и целесообразности применения отработанного авиационного топлива, как вторичного ресурса, а также способности его переработки.*

*Ключевые слова: авиационное топливо, вторичный ресурс, смазочные материалы, регенерация масел, переработка.*

## INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING SPENT AVIATION FUEL AS A SECONDARY RESOURCE

N. G. Cherkasova, L. E. Cherkasov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 5hat@bk.ru

*The presented material presents the results of a study of the possibility and feasibility of using spent aviation fuel as a secondary resource, as well as methods of its processing.*

*Keywords: aviation fuel, secondary resource, lubricants, oil regeneration, recycling.*

При эксплуатации воздушных судов одной из экологических проблем является образование больших объемов отработанного топлива, применение которому на территории России не носит массового характера, и не является обязательной деятельностью хозяйственника. При этом отработанное топливо содержит достаточно широкий спектр полезных компонентов. Конструктивным решением данной проблемы является возврат отработанных нефтепродуктов в оборот предприятия, когда хозяйственник не платит за утилизацию и имеет возможность повторного их использования.

Аналитическое исследование известных способов использования отработанных видов топлива выявило ряд направлений, где они применяются не по прямому назначению. К таким направления относятся: смазка простых узлов трения, использование при флотационной очистке руды на обогатительных фабриках, для уничтожения сорняков в сельском хозяйстве, для борьбы с пылью на грунтовых дорогах и др. Одним из перспективных современных направлений применения отработанного топлива является функционирование отопительных систем на его основе [1]. Это отопительные системы для экологически чистого сжигания отработанных масел, дизельного топлива и авиационного керосина. Преимущество данного способа заключается в том, что хозяйственники за первый отопительный сезон полностью окупают вложенные средства, получая при этом безопасное, стабильное, дешевое тепло. Особое внимание уделяется системам предварительной очистки топлива и подготовки его к сжиганию для недопущения нарушения экологических требований [2-3].

Спектр эмитируемых из авиационных двигателей веществ достаточно широк и зависит от типа двигателя и используемого топлива.

Оксид углерода, углеводороды и сажевые частицы появляются вследствие неполного окисления топлива и его пиролиза. При протекании окислительных процессов, в которых участвуют в основном летучие органические соединения, олефины и оксиды азота, образуются органические кислоты, глав-

ным образом, муравьиная и уксусная. Основные виды и количество соединений и веществ, содержащихся в свежем и отработанном топливе представлены на рис. 1.

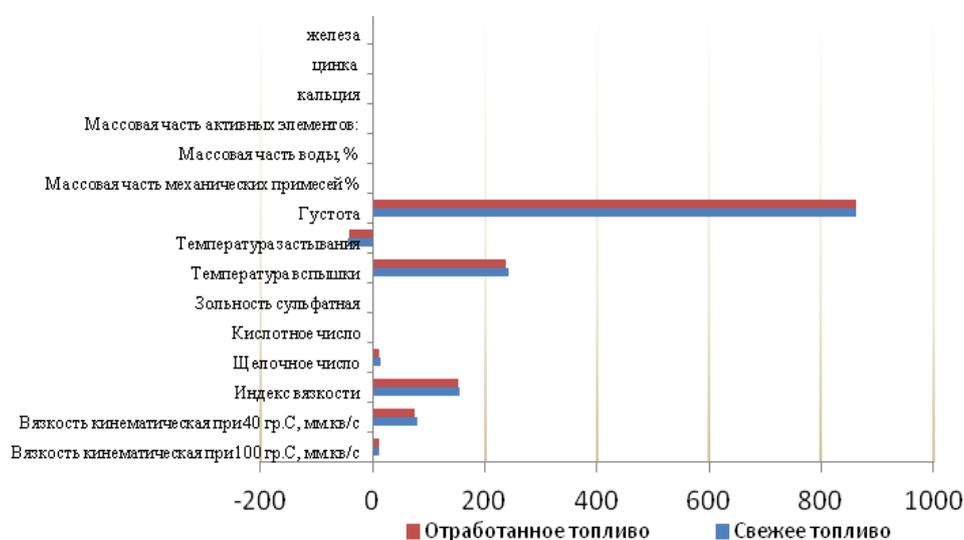


Рис. 1. Содержание соединений и веществ в свежем и отработанном топливе

В экспериментальной части рассматривались такие виды топлива как авиакеросин марки ТС-1, который бывает высшего и первого сорта, а также реактивное топливо ТС-1.

Данные по изменению фактической концентрации некоторых веществ в зависимости от способа обращения с отработанным топливом представлены на рис. 2.

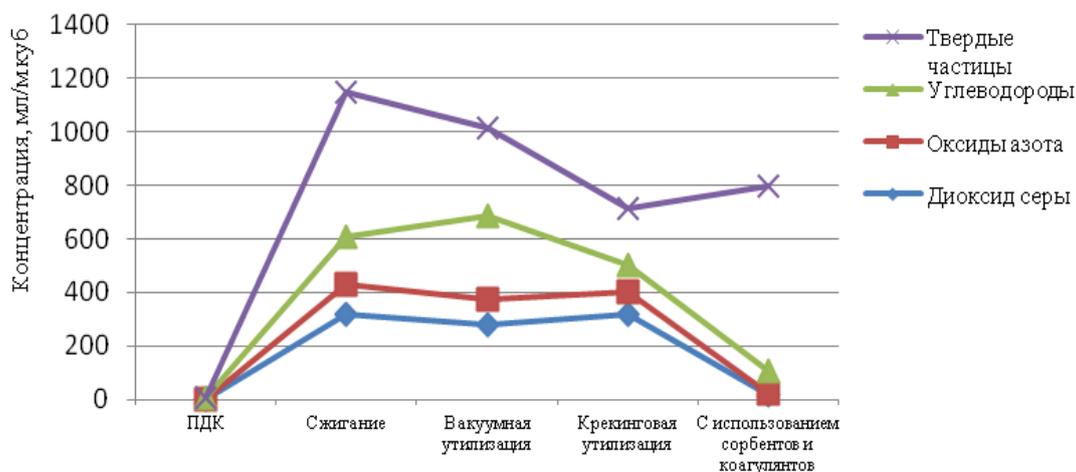


Рис. 2. Концентрация веществ и соединений в зависимости от способа обращения с отработанным авиационным топливом

Наиболее перспективным и целесообразным в экономическом и экологическом отношении является создание на предприятиях локальных установок переработки отработанного топлива, которые позволят уменьшить объемы не утилизируемых отходов, осуществлять регенерацию и повторное использование регенератов на предприятии. Отработанное топливо обычно собирают и подвергают регенерации с целью сохранения ценного сырья, что в значительной мере является экономически выгодным [4]. Топливо с высокой степенью загрязнения подвергают регенерации на специальных установках.

В последние годы все большее распространение получают гидрогенизационные процессы очистки отработанных масел. Это связано как с широкими возможностями получения высококачественных

масел, увеличения их выхода, так и с большей экологической чистотой процесса [5]. Биологические методы утилизации топливосодержащих отходов, основанные на биохимическом окислении углеводов, особенно эффективно используются при ликвидации разливов топлива на почву. Термохимические методы предполагают глубокую переработку отходов топлива с помощью современных высокотемпературных технологий, при которых происходит изменение структурного состава исходного сырья.

Проведенные авторами исследования указывают на необходимость и перспективность применения в России отработанного авиационного топлива как вторичного ресурса. Данный отход является сырьем для производства вторичных материалов, и поэтому должен подлежать обязательному сбору.

#### Библиографические ссылки

1. Рачевский Б.С. Технологии коммерческой утилизации факельных попутных газов нефтяных месторождений // Мир нефтепродуктов. 2008. № 7. С. 24–31.
2. Башенко Н.С., Пуртов П.А., Аджиев А.Ю. и др. Возможности производства нового авиационного топлива АСКТ // Транспорт на альтернативном топливе, 2012. № 3 (27). С. 43–46.
3. Любименко, В.А. Дисс. на соискание ученой степени доктора химических наук. Молекулярное моделирование и квантово-химические расчеты в изучении процессов нефтепереработки и нефтехимии. М., 2015. С. 235-242.
4. Харин А.А., Шевченко И.В., Яновский Л.С. Возможности и особенности применения альтернативных топлив в авиационных двигателях //Авиац. техника. 2002. № 1. С. 54-56
5. Климов О.В., Аксенов Д.Г., Коденев Е.Г. и др. Разработка технологии БИМТ-Аркон® для комплексной переработки углеводородного сырья // Катализ в промышленности. 2005. № 1. С. 18–25.

#### References

1. Rachevskiy B.S. Mir nefteproduktov. 2008, no. 7, pp. 24–31. (In Russ.)
2. Bashchenko N.S., Purtov P.A., Adzhiyev A.YU., Kovalev I.Ye., Mavritskiy V.I., Zaytsev V.P. Transport na al'ternativnom toplive. 2012, no. 3 (27), pp. 43–46.
3. Lyubimenko, V.A. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni doktora himicheskikh nauk. Molekulyarnoe modelirovanie i kvantovo-himicheskie raschety v izuchenii processov neftepererabotki i neftekhimii. M., 2015. S. 235-242.
4. Harin A.A., SHEvchenko I.V., YAnovskij L.S. Vozmozhnosti i osobennosti primeneniya al'ternativnyh topliv v aviacionnyh dvigatelyah //Aviac. tekhnika. 2002. № 1. S. 54-56.
5. Klimov O.V., Aksekov D.G., KodenevYe.G. Kataliz v promyshlennosti. 2005, no. 1, pp. 18–25.

© Черкасова Н. Г., Черкасов Л. Е., 2022



**Секция**

**«КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО СЫРЬЯ»**

УДК 633.52.854.434:676.017.3.034.24

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСТРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ

М. Е. Арканова\*, Н. Ю. Демиденко, В. В. Тарнопольская, 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: littlestranger@mail.ru

*Рассматривается вопрос утилизации костры технической конопли, которая была выращена на территории Красноярского края. В работе предложен метод, позволяющий эффективно утилизировать костру технической конопли, которая в настоящее время не перерабатывается.*

*Ключевые слова: техническая конопля, утилизация, переработка, биоконверсия.*

## PROSPECTS OF USING SHIVE OF TECHNICAL HEMP

M. E. Arkanova\*, N. Y. Demidenko, V. V. Tarnopolskaya, O. N. Eremenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: littlestranger@mail.ru

*In the thesis, the issue of recycling shive of technical hemp, which was grown on the territory of the Krasnoyarsk Territory, is considered. The thesis proposes a method that allows to effectively dispose of the shive of technical hemp, which is currently not processed.*

*Keywords: industrial hemp, recycling, processing, bioconversion.*

В настоящее время с технологической точки зрения перспективным не древесным растительным сырьём является техническая конопля. На данный момент основными сферами переработки технической конопли являются: пищевая промышленность, строительство, энергетика, производство волокна на текстиль, производство целлюлозы [1].

Однако, в качестве сырья для переработки в основном используют волокнистую часть или семена, а стебель, или костра по-другому, которая, составляет 65-70 % массы лубяного стебля, не перерабатывается, а просто остаются на полях сбора. Поэтому вопрос утилизации костры технической конопли является актуальным. Это и стало целью данного исследования.

Перед процессом биоконверсии был проведен химический анализ лигноуглеводного комплекса, по методикам принятым в химии древесины [2].

Костра представляет собой одревесневшую часть стебля и в изначальном её виде не пригодна для переработки и проведения химического анализа, что вызывает необходимость размол и фракционирования.

Для предварительной подготовки костры технической конопли провели размол с помощью ножевой размольной машины, который был осуществлен сотрудниками кафедры Машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М. В. Решетнева. В результате были получены образцы с разной степенью измельчения. Так были получены две фракции костры технической конопли, после чего методом квартования провели фракционирование. В первом преобладают частицы размером 2 мм, а у второго преобладают частицы размером менее 2 мм. По внешним характеристикам для процесса биоконверсии благоприятным будет фракционный состав с размером около 2 мм, который был выбран в качестве исследуемого образца костры конопли.

Результаты химического анализа лигноуглеводного комплекса костры конопли приведены в таблице 1.

По данным таблицы 1 видно, что на долю лигноуглеводного комплекса приходится около 80 % от исходного сырья. Из них на долю углеводной части приходится около 50 %.

Изученный химический состав костры технической конопли характеризуется высоким содержанием лигноуглеводного комплекса. Это свидетельствует о потенциальной пригодности рассматриваемого вида сырья для биоконверсии.

Таблица 1

## Содержание компонентов лигноуглеводного комплекса в костре технической конопли

Фракция	ЛГП	ТГП	Лигнин
Фракция 1	16,50	34,11	30,62

Обзор литературы показал перспективность использования базидиальных грибов рода *Pleurotus ostreatus*. Штамм *Pleurotus ostreatus* способен утилизировать любые целлюлозо- и лигнинсодержащие растительные остатки, что и стало решающим фактором в выборе данного вида продуцентов [3].

Биоконверсию костры технической конопли проводили поверхностным культивированием, используя в качестве посевного материала агаровые блоки, вырезанные из краевой зоны роста семисуточной культуры. Культивирование проводили в течение восьми суток при температуре  $(27 \pm 1)^\circ\text{C}$  [4].

На рисунке 2 представлена динамика роста гриба *Pleurotus ostreatus* на растительном субстрате в течении восьми суток.

Рис. 2. Динамика роста *Pleurotus ostreatus* на растительном субстрате

На восьмые сутки грибы рода *Pleurotus ostreatus* полностью освоили субстрат. Влияние степени подготовки на процесс биодеструкции оценивали по значению скорости роста и убыли массы. Скорость роста составила 8,75мм/сут., а убыль массы 20,5%.

Как показали проведенные исследования, штамм гриба *Pleurotus* способен к росту и, как следствие, утилизации выбранного вида субстрата. Костра технической конопли по своему химическому составу является легкодоступным субстратом для мицелия гриба *Pleurotus*, при этом необходимо отметить достаточную способность *P. ostreatus* к утилизации этого растительного материала.

После биоконверсии был проведен анализ лигноуглеводного комплекса. Результаты и сравнение с исходными данными представлены в таблице 2.

Таблица 2

## Состав лигноуглеводного комплекса костры технической конопли до и после процесса биоконверсии

Фракция	ЛГП	ТГП	Лигнин
Фракция 1	16,50	34,11	30,62
	14,06*	25,48*	19,66*

\* Значения после проведения биоконверсии с учетом убыли массы.

По полученным экспериментальным данным мы можем отметить ассимиляцию компонентов лигноуглеводного комплекса культурой *Pleurotus* около 22%.

В целом, по результатам проведенных исследований, использование костры технической конопли в качестве субстрата для биоконверсии целесообразно. Экспериментально установлено, что использование в качестве инокулята агарового блока *Pleurotus ostreatus* позволяет вести процесс биоконверсии с достаточной эффективностью, способствует быстрой колонизации субстрата мицелием. Это

решает проблему утилизации костры технической конопли, которая на данный момент не нашла квалифицированного применения.

### Библиографические ссылки

1. Современное коноплеводство России. [Электронный ресурс]. URL: <http://tku.org.ua/ru/view-news/>
2. 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.
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.

### References

1. Modern hemp growing in Russia. [Electronic resource]. URL: <http://tku.org.ua/ru/view-news/>
2. Ryazanova, T.V. CHEMISTRY OF WOOD. Part 2. The main components of wood: textbook. allowance for students in the specialty 240406 Technology of chemical wood processing of all forms of education and direction 240100 Chemical technology and biotechnology / T.V. Ryazanova, N.A. Chuprova, E.V. Isaev. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010. 228 p.
3. Kulikova, N.A., Klein, O.I., Stepanova, E.V., Koroleva O.V. The use of basidial fungi in technologies for the processing and disposal of industrial waste: fundamental and applied aspects // Applied Biochemistry and Microbiology. 2011. V. 47. No. 6. pp. 619–634.
4. Zaikina, N.V. Fundamentals of biotechnology of higher fungi: a textbook for students. training for example Biology / N. V. Zaikina. Moscow: Science Prospect, 2007. 336 p. Text : direct.

© Арканова М. Е., Демиденко Н. Ю., Тарнопольская В. В., Еременко О. Н., 2022

УДК 66.015.23

## СПОСОБ СОЗДАНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В АППАРАТЕ С МЕШАЛКОЙ\*

Н. А. Войнов\*, А. С. Фролов, А. В. Богаткова, 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

*Разработан и исследован новый способ создания межфазной поверхности в аппарате с мешалкой. Численным моделированием рассчитаны профили скорости и давления в жидкости. Определены кинетические параметры вращающегося газо-жидкостного слоя.*

*Ключевые слова: межфазная поверхность, мешалка, моделирование, газосодержание, коэффициент массоотдачи.*

## METHOD FOR CREATING INTERPHASE SURFACE IN THE APPARATUS WITH A STIRMER

N. A. Voinov\*, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova, 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 method of creating the interfacial surface in an apparatus with an agitator has been developed and investigated. By numerical simulation the velocity and pressure profiles in the liquid are calculated. The kinetic parameters of the rotating gas-liquid layer are determined.*

*Keywords: interface, stirrer, modeling, gas content, mass transfer coefficient.*

Газо-жидкостные аппараты с перемешивающими устройствами применяются для осуществления гидромеханических и массообменных процессов в различных отраслях промышленности. Наиболее широкое применение нашли аппараты с перемешивающими устройствами, снабженные барботером [1]. Для снижения затрат на транспорт газа разработаны аппараты с самовсасывающими мешалками [2]. К недостаткам таких устройств относят снижение производительности по газу с увеличением глубины погружения устройства в жидкость. Они сложны в изготовлении и имеют сравнительно высокие энергозатраты [3].

В работе представлен новый способ образования межфазной поверхности в аппарате с мешалкой, который является перспективным и простым в конструктивном исполнении. Данный способ основан на создании условий для образования локальных зон с пониженным давлением в жидкости за вращающимися лопатками мешалки и обеспечении доступа газа к ним.

Как установлено экспериментально, лопатки мешалки, перемещаясь с угловой скоростью  $\omega$ , вызывают вращение жидкости в рабочем объеме аппарата с угловой скоростью  $\omega_1$ . При этом возникает сила инерции, которая выдавливает жидкость на гладкую стенку аппарата с образованием открытой газовой полости.

В случае подвода газовой полости на лопатку мешалки происходит образование межфазной поверхности. Величина коэффициента массоотдачи имеет не большую величину и не превышает  $150 \text{ ч}^{-1}$ .

---

\* 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).

При целенаправленном замедлении угловой скорости вращения жидкости в аппарате с мешалкой, например, путем установки на стенке аппарата определенного количества ребер, за лопатками устройства образуются многочисленные пузырьки газа, которые формируют развитую межфазную поверхность.

В этой связи, сделано предположение, что в жидкости за лопатками мешалки возникают зоны с пониженным давлением, куда при соответствующих условиях устремляется газ из газовой полости, что и приводит к образованию межфазной поверхности.

Результаты численного моделирования в программном обеспечении Comsol Multiphysics представленные на рис. 1 подтвердили выше сказанное. Согласно полученным данным, за вращающимися лопатками мешалки в жидкости наблюдается пониженное давление, что и обеспечивает перепад давления необходимый для внедрения газа в жидкость.

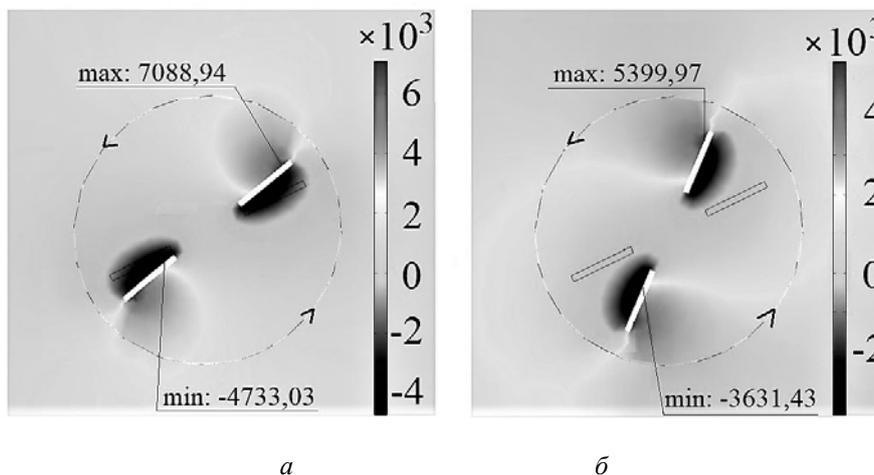


Рис. 1. Расчетное давление (Па) в жидкости за лопатками мешалки при времени расчета 1 с (а) и 4 с (б)  
Число оборотов  $n = 1000$  об/мин, диаметр мешалки  $d = 70$  мм

Величина перепада давления зависит от угловой скорости вращения жидкости и числа оборотов мешалки, с увеличением которых перепад давления возрастает. При достижении  $n > 1000$  об/мин в жидкости за лопатками фиксируется давление ниже атмосферного. Распределение которого, по длине лопатки 30 мм и 230 мм, рис. 2, примерно одинаково.

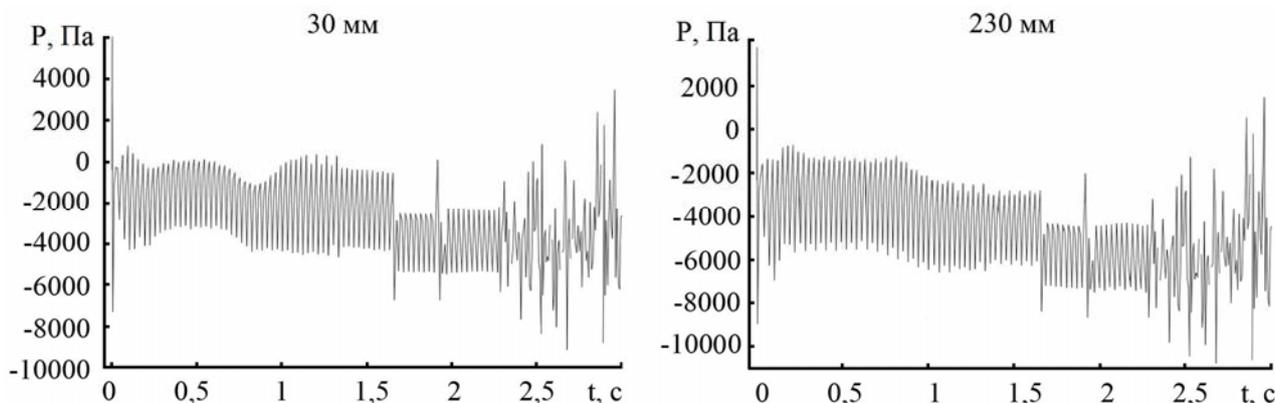


Рис. 2. Изменение давления за лопаткой мешалки от времени расчета

Экспериментальные значения коэффициента массоотдачи при абсорбции, представлены на рис. 3. Величина коэффициента массоотдачи возрастает с ростом числа оборотов мешалки и высоты лопатки и достигает  $1000 \text{ ч}^{-1}$ , а межфазная поверхность –  $900 \text{ м}^2$ , что согласуется с данными, полученными в аппарате с мешалкой и установленным в нем барботера, рис. 3 точки 3.

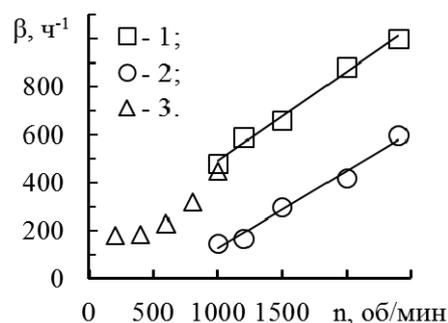


Рис. 3. Изменение коэффициента массоотдачи от числа оборотов мешалки  
Экспериментальные точки при диаметре мешалки  $d = 70$  мм.  
(1 – 3): 1 – длина лопатки мешалки 270 мм; 2 – 50 мм; 3 – мешалка с барботером  
при расходе газа  $7 \text{ м}^3/\text{час}$ .

При использовании разработанного способа не требуются устройства для транспортирования газа, что позволяет снизить энергозатраты на подачу газа в аппарат. Данный способ востребован, например, при конструировании биореакторов и аппаратов для насыщения газа жидкостью.

#### Библиографические ссылки

1. Соколов В. Н., Яблокова М. А. Аппаратура микробиологической промышленности. Л.: Машиностроение, 1988. 278 с.
2. Пат. ЕА003815В1 Евразийская патентная организация Перемешивающий аппарат и способ перемешивания газа в закрытом реакторе / Хультольм С-Э., Лилья Л., Ньюман Б. № 200300175 : заявл. 19.07.2001 ; опубл. 26.06.2003, Бюл. № 3. 8 с.
3. Пленочные биореакторы / Н. А. Войнов, Сугак Е. В., Николаев Н. А. и др. // Красноярск: БОРГЕС, 2001. 252 с.

#### References

1. Sokolov V. N., Yablokova M. A. Apparatura mikrobiologicheskoy promy`shlennosti [Apparatus for the microbiological industry]. L.: Mashinostroenie Publ, 1988. 278 p.
2. Peremeshivayushhij apparat i sposob peremeshivaniya gaza v zakry`tom reaktore [Mixing apparatus and method of gas mixing in a closed reactor] / Hul`txol`m S-E., Lil`ya L., Nyuman B. Patent Evrazijskaya patentnaya organizaciya no. EA003815V1, 2003.
3. Plenochny`e bioreaktory` [Film Bioreactors] / N. A. Vojnov, Sugak E. V., Nikolaev N. A. // Krasnoyarsk: BORGES Publ, 2001. 252 p.

© Войнов Н. А., Фролов А. С., Богаткова А. В., Чернов В. А., 2022

УДК 676.16

## **ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ НАБОРНОЙ ГАРНИТУРЫ ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА РАЗМОЛ ХВОЙНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Д. Е. Зырянов, Н. С. Решетова, А. А. Петрова, Ю. Д. Алашкевич

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: zde13Den@yandex.ru

*В статье рассматривается влияние профиля наборной гарнитуры дисковой мельницы на размол хвойной целлюлозы. Исследование реализовано с использованием гарнитуры собранной в конической форме.*

*Ключевые слова: размалывающая гарнитура, дисковая мельница, размол, волокно, целлюлоза*

## **INFLUENCE OF THE PROFILE OF A MULTI PIECE KNIFE SET OF DISK MILL ON THE REFINING OF SOFTWOOD PULP**

D. E. Zyryanov, N. S. Reshetova, A. A. Petrova, YU. D. Alashkevich

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: zde13Den@yandex.ru

*The article changes the influence of the profile of a multi piece knife set of disk mill on the paper-forming characteristics and physical and mechanical properties of softwood pulp. The study carried out using a headset assembled in a conical shape.*

*Keywords: knife set, disk mill, refining, fiber, pulp*

Несмотря на то, что в мире все больше ходит разговоров об уменьшении использования бумажных полуфабрикатов, количество продаваемой продукции целлюлозно-бумажных производств говорит о том, что этот товар все еще востребован не только в России, но и по всему миру.

Производство бумаги сложный процесс, ведь качество продукта будет зависеть от многих причин. Один из важнейших технологических процессов, определяющих качественные показатели готовой продукции является размол. В процессе размола волокно рубится и фибриллируются, при этом повышаются бумагообразующие характеристики волокна, от которых в последствии будут зависеть физико-механические показатели готовой продукции. Также размол сопровождается высокой энергоемкостью. Благодаря перечисленным факторам можно говорить о том, что процесс размола требует проведения исследований с целью повышения эффективности подготовки волокнистых полуфабрикатов [1-3].

Объектом исследования выступила продукция ОАО «Группа «Илим» в г. Братске – беленая сульфатная хвойная целлюлоза (БСХЦ), размалываемая на полупромышленной дисковой мельнице.

Исследования проводились в лаборатории размола кафедры машин и аппаратов промышленных технологий (МАПТ) СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Размол проводился со следующими характеристиками: концентрация волокнистой массы 2 %; частота вращения ротора – 2000 об/мин; межножевой зазор – 0,2 мм. Перед началом размола проводился роспуск на гидроразбивателе. Исследуемой гарнитурой выбрана наборная гарнитура, собранная в конической форме (рис. 1) [4].

Ножи на кольцах наборной гарнитуры прямолинейные, но благодаря форме колец гарнитура позволяет получить некоторые преимущества конической мельницы при использовании на дисковой, что разительно отличает ее от других гарнитур с прямолинейными ножами [5].

Результаты исследований приведены на рисунках 2 – 3.

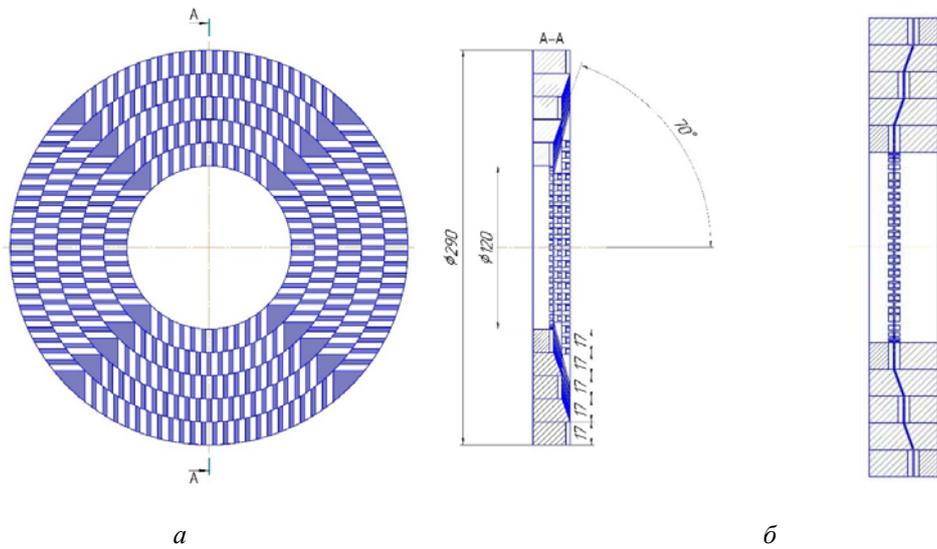


Рис. 1. Наборная гарнитура (коническая форма)  
а – общий вид, б – ротор и статор

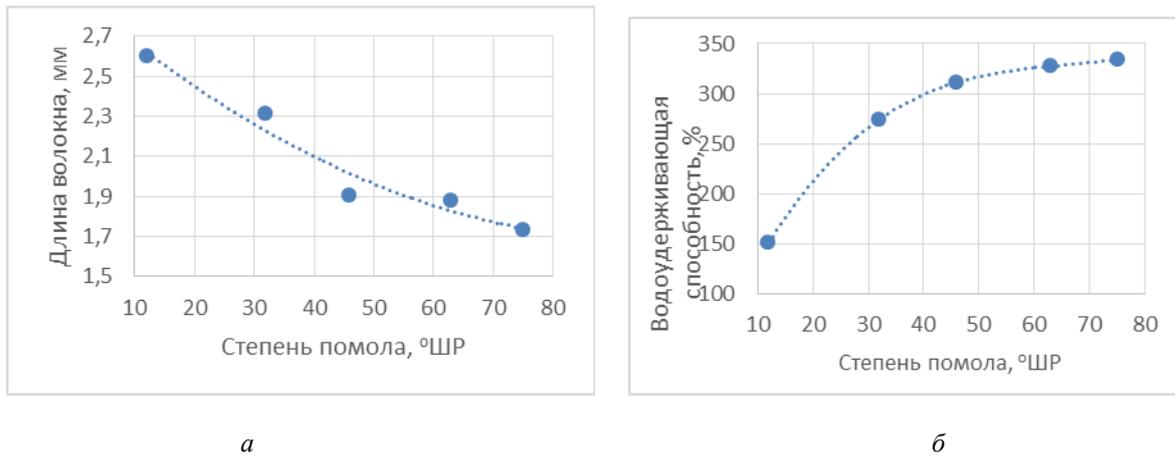


Рис. 2. Результаты размола – бумагообразующие показатели волокна  
а – График зависимости длины волокна от степени помола,  
б – График зависимости водоудерживающей способности от степени помола

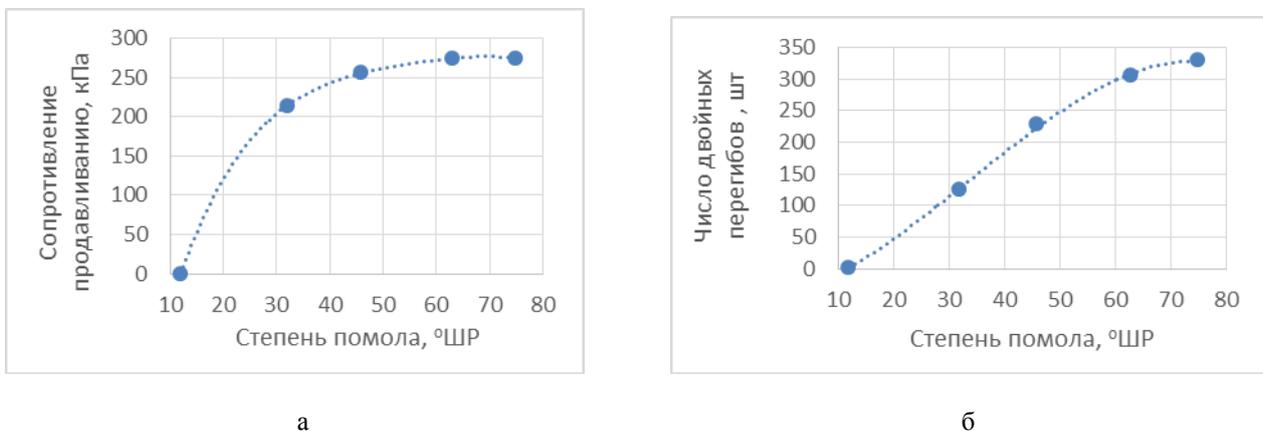


Рис. 3. Физико-механические характеристики готовой продукции  
а – График зависимости сопротивления продавливанию от степени помола,  
б – График зависимости числа двойных перегибов от степени помола

Интенсивность размола сохранялась на протяжении всего времени размола, что показывает преимущество гарнитуры перед некоторыми другими гарнитурами. Так волокнистая суспензия достигла 75 °ШР за 25 минут размола. Из графиков можно отметить, что в результате размола волокнистой массы значение водоудерживающей способности волокнистой массы повысилось на почти 200 % (рис 2, а), при этом длина волокон сократилась почти на 1 мм (рис. 2, б).

Из графиков следует отметить, что примерно с 63 °ШР интенсивность повышения физико-механических характеристик значительно снизилась. Благодаря этому можно сделать вывод, что при использовании гарнитуры в промышленных условиях наиболее эффективным будет размол до этого градуса помола, так как это позволит сократить время размола до 20 минут при небольшой большой потере в характеристиках (водоудерживающей способности, числа двойных перегибов).

### Библиографические ссылки

1. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.
2. Алашкевич Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. докт. техн. наук. Ленинград, 1980. 334 с
3. Фляте Д. М. Свойства бумаги. СПб. : Лань, 2012. 384 с.
4. Патент № 2314380 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30 (2006.01) B02C 7/12 (2006.01). Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы: № 2006121708/12 : заявл. 19.06.2006 : опубл. 10.01.2008 / Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И., Карбышев М.А. [и др.] 9 с. : ил. Текст : непосредственный.
5. Патент № 2314381 Российская Федерация, МПК D21D 1/30 (2006.01)B02C 7/12 (2006.01). Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы: № 2006121711/12 : заявл. 19.06.2006 : опубл. 10.01.2008 / Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И., Набиева А.А. 7 с. : ил. Текст : непосредственный.

### References

1. Ivanov, S. N. Tehnologija bumagi [Paper technology]/ S. N. Ivanov M.: Shkola bumagi, 2006. 696 p.
2. Alashkevich Ju.D. Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nyh mashina. Dis. dok. tehn. nauk. [Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines. Dr. techn. sci. diss]. Leningrad., 1980, 334 p.
3. Flyate D. M. Svoystva bumagi. SPb. [Paper properties] : Lan', 2012. 384 p.
4. Alashkevich Ju.D., Kovalev V.I., Karbyshev M.A. Razmalyvajushhaja garnitura: № 2006121708/12 [Grinding filling: № 2006121708/12]. Patent RF, no. 2314380 C1, 2006.
5. Alashkevich Ju.D., Kovalev V.I., Nabieva A.A. Razmalyvajushhaja garnitura: № 2006121711/12 [Grinding filling: № 2006121711/12]. Patent RF, no. 2314381, 2006.

© Зырянов Д. Е., Решетова Н. С., Петрова А. А., Алашкевич Ю. Д., 2022

УДК 676.032.1/2

## ФАУТНАЯ ДРЕВЕСИНА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

А. А. Имамов, М. А. Лучкин, И. И. Прикатов, Ю. А. Амбросович, Р. А. Марченко

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

*Работа посвящена исследованию возможности использования фаутной древесины с целью создания технической целлюлозы и повышения комплексного использования древесины.*

*Ключевые слова: сырье, пороки древесины, варка, целлюлоза, экология.*

## FAUT WOOD FOR CHEMICAL PROCESSING

A. A. Imamov, M. A. Luchkin, I. I. Prikatov Y. A. Ambrosovich, R. A. Marchenko

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

*The work is devoted to the study of the possibility of using faut wood in order to create technical pulp and increase the integrated use of wood.*

*Keywords: raw materials, wood defects, pulping, cellulose, ecology.*

**Введение.** В лесном фонде Российской Федерации леса занимают 809 млн. га, из них 15,4 % составляют сосновые насаждения [1]. Предприятия, занимающиеся переработкой леса, в основном используют деловую древесину, а неликвидную сжигают или оставляют погибать в лесах. По данным Федеральной службы статистики ежегодно от воздействия насекомых, а также техногенных опасностей повреждается около 45 тыс. га лесных насаждений [2]. Поврежденная древесина теряет свои потребительские свойства, что в свою очередь теряет интерес у заготовщиков. Сухостойный лес имеет трещины, червоточины, поэтому является основным фактором лесных пожаров, что способствует уничтожению лесных массивов и неблагоприятно влияет на экологию нашей страны. Поэтому использование фаутной древесины может уменьшить востребованность сплошных санитарных рубок и увеличит лесовосстановление.

**Эксперимент.** В качестве базового сырья была использована фаутная древесина рис.1 хвойных пород (сосна). Исследованию подверглись три образца имеющие разную степень поврежденности и пороки. Место произрастания образцов является Красноярский край, г. Лесосибирск. Возраст деревьев ориентировочно составляет 20 – 30 лет. Степень поражения составляло в среднем от 20 до 25 % от всей массы растительного сырья. Для определения рапорта варки определялась влажность древесины, предварительно измельченной в щепы согласно ГОСТ 16483.7-71. Так как в настоящее время, наиболее распространенным способом получения целлюлозы является сульфатный, эксперимент строился на нем [4, 5].

Предварительно взвешенную щепу, визуальнo проанализировали, на количественное содержание имеющихся участков поражения, от общей массы, взятой на варку, результаты показаны в табл. 1. Взвешенную щепу помещали в металлические ампулы, которые погружались в автоклав заполненный глицерином, заранее нагретый до 50 °С. Регулирование температуры осуществлялось с помощью терморегулятора установленного на крышке автоклава. Варку проводили по предварительно заданному температурно-временному графику. Помимо температурно-временного графика составлялся перечень технологических показателей: влажность древесной щепы 5,5 %, гидромодуль – 5, расход активной щелочи – 18 % к абсолютно-сухой щепе, температура варки 170 °С, продолжительность варки 180 минут [3]. По окончании варки ампулы вынимали из глицериновой ванны и охлаждали проточной водой. Целлюлозу из ампулы выгружали в сечу и тщательно промывали. После промывки проводили разделение сваренной целлюлозы от непровара. Влажную целлюлозу после варки,

взвешивали на технических весах, высушивали до постоянной массы рис. 2 и определяли общий выход полуфабриката табл. 1.



Рис. 1. Образец пораженной древесины

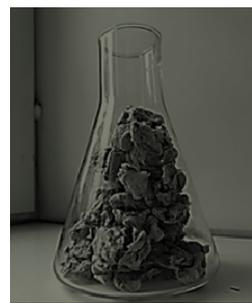


Рис. 2. Образец полученной сульфатной небеленой целлюлозы

Таблица 1

#### Выход целлюлозы

Номер образца	Количество щепы имеющей поражение, %	Выход экспериментальной целлюлозы, %	Выход целлюлозы, литературные данные [4]
Образец № 1	22	38	44 – 46 %
Образец № 2	21	39	
Образец № 3	22	38	

**Выводы.** Таким образом, получение целлюлозы сульфатным способом из сосновой древесины открывает возможность комплексной переработки фаутной древесины хвойных пород. По полученным данным определение выхода целлюлозы на наш взгляд является перспективным и рациональным направлением использования пораженной древесины для получения целлюлозы. Результатом использования такой древесины несет снижение лесных пожаров и благоприятных условий для лесовосстановления.

#### Библиографические ссылки

1. Рослесхоз: каждое третье дерево в российском лесу лиственница [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mnr.gov.ru/press/news/rosleskhoz\\_kazhdoe\\_trete\\_derevo\\_v\\_rossiyskom\\_lesu\\_listvennitsa/?special\\_version=Y](https://www.mnr.gov.ru/press/news/rosleskhoz_kazhdoe_trete_derevo_v_rossiyskom_lesu_listvennitsa/?special_version=Y) (дата обращения 05.10.2021).
2. Охрана окружающей среды в России. 2020: Стат. сб. / Росстат. 0-92 М., 2020. 113 с.
3. Оболенская А.В., Ельницкая Е.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 319 с.
4. Пен Р.З. Технология волокнистых полуфабрикатов целлюлозно-бумажного производства: Учебное пособие / Р.З. Пен, Н.В. Каретникова. Красноярск: ООО Издательство «Красноярский писатель», 2012. 234 с. Иванов Ю. С., Никандров А. Б.
5. Технология целлюлозы. Варочные растворы, варка и отбелка целлюлозы: учебно-практическое пособие / СПбГТУРП. СПб., 2014. 41 с.

#### References

1. Rosleskhoz: every third tree in the Russian forest is a larch [Electronic resource]. URL: [https://www.mnr.gov.ru/press/news/rosleskhoz\\_kazhdoe\\_trete\\_derevo\\_v\\_rossiyskom\\_lesu\\_listvennitsa/special\\_version=Y](https://www.mnr.gov.ru/press/news/rosleskhoz_kazhdoe_trete_derevo_v_rossiyskom_lesu_listvennitsa/special_version=Y) (accessed 05.10.2021).
2. Environmental protection in Russia. 2020: Stat. Sat. / Rosstat. 0-92 M., 2020. 113 p.
3. Obolenskaya A.V., Elnitskaya E.P., Leonovich A.A. Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose. M.: Ecology, 1991. 319 p.
4. Pen R.Z. Technology of fibrous semi-finished products of pulp and paper production: Textbook / R.Z. Pen, N.V. Karetnikov. Krasnoyarsk: LLC Publishing house "Krasnoyarsk writer", 2012. 234 p. Ivanov Yu. S., Nikandrov A. B.
5. Cellulose technology. Cooking solutions, pulp pulping and bleaching: educational and practical guide / SPbGTURP. St. Petersburg, 2014. 41 p.

УДК 577.151.35:582.28

## ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТОВ ИЗ ЛИСТЬЕВ ТОПОЛЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РОСТА ЗАПЛЕСНЕВЕЛЫХ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ\*

Е. В. Исаева\*, О. О. Мамаева, Н. С. Барина

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 работе изучены ростовые показатели пшеницы Новосибирская 31 при обработке семян веществами спиртового экстракта и его отдельными фракциями, полученными из опавших и зеленых листьев тополя бальзамического.*

*Ключевые слова: тополь бальзамический, листья, экстракты, пшеница, грибы Penicillium.*

## INFLUENCE OF EXTRACTS FROM POPLAR LEAVES ON GROWTH INDICATORS OF MOLDY WHEAT SEEDS

E. V. Isaeva\*, O. O. Mamaeva, N. S. Barinova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\* E-mail: isaevaelena08@mail.ru

*The paper studied the growth rates of Novosibirskaya 31 wheat when treated with total alcohol extracts and its individual fractions from fallen and green leaves of balsamic poplar.*

*Keywords: balsamic poplar, leaves, extracts, wheat, Penicillium mushrooms.*

Экстрактивные вещества вегетативной части тополя обладают биологической активностью [1]. В литературе имеются сведения об исследовании как водо-, так и спирторастворимых веществ вегетативной части тополя бальзамического в качестве регуляторов роста яровой пшеницы [2].

Известно, что зерно злаковых культур подвержено заболеваниям, одним из которых является плесневение семян в процессе хранения, вызванное, в частности, грибами рода *Penicillium*. Плесневение семян приводит к снижению всхожести, а также ослабляет сопротивляемость семенного материала к другим болезням [3], в связи с этим поиск веществ, обладающих антимикробной активностью является актуальной задачей.

Ранее нами исследована антимикробная активность спирторастворимых веществ листьев тополя бальзамического на примере пораженных зерен пшеницы грибами рода *Penicillium*. Установлено, что при обработке заплесневелых семян пшеницы Новосибирская 31, веществами спиртовых экстрактов как зеленых, так и опавших листьев тополя, снижается зараженность до 50-60%, при этом зерно сохраняет способность к прорастанию.

В настоящем сообщении представлены результаты проращивания семян пшеницы, обработанных спирторастворимыми веществами листьев тополя.

Экстракты получали двумя способами. Первый способ – настаивание сырья в этиловом спирте при комнатной температуре в течение трех суток с жидкостным гидромодулем 1:40 для зеленых и 1:20 для опавших листьев. Второй способ – выделение веществ из листьев тополя бальзамического с помощью 3-х часовой экстракции этиловым спиртом при кипячении с жидкостным гидромодулем 1:20.

---

\*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).

Полученные экстракты упаривали и подвергали фракционированию с использованием растворителей с возрастающей полярностью: петролейный эфир, диэтиловый эфир, этилацетат и бутанол. Рабочие растворы готовили с концентрацией 4 и 6 мг/мл [4].

Зерно замачивали на 20 мин в соответствующих экстрактах и по 10 шт. (в трех проворностях) раскладывали в чашки Петри на увлажненную стерильной дистиллированной водой фильтровальную бумагу. Проращивание семян проводили при 25 °С в термостате. Контролем служила дистиллированная вода [5].

Ростостимулирующая активность спирторастворимых веществ листьев тополя зависит от способа получения и концентрации экстрактов. Влияние экстрактов из листьев тополя бальзамического, полученных методом настаивания, с концентрацией 6 мг/мл на ростовые показатели семян пшеницы Новосибирской 31 представлено в табл.1.

Таблица 1

Ростовые показатели семян пшеницы Новосибирская 31

Экстракт	Зеленые листья		Опад	
	средняя длина ростка, мм	средняя длина корня, мм	средняя длина ростка, мм	средняя длина корня, мм
Дистиллированная вода	38,3±5,0	66,0±5,49	38,3±5,0	66,0±5,49
Спиртовой	47,1±7,0	53,0±15,0	36,9±7,5	43,2±11,0
Петролейный	15,5±4,0	43,5±6,0	66,7±11,5	61,7±16,5
Диэтиловый	35,0±3,5	59,5±6,0	73,8±4,0	55,5±13,0
Этилацетатный	49,0±3,5	54,4±4,0	59,6±5,50	62,7±7,5
Бутанольный	22,0±2,5	28,2±8,0	29,2±23,10	56,7±3,50

Исходя из полученных данных (табл.1) следует, что длина ростка у обработанных семян пшеницы спирторастворимыми веществами зеленых листьев, полученными методом настаивания, в концентрации 6 мг/мл составляет 123 % к контролю, при 4 мг/мл только 85 % от контроля. Длина корня не зависимо от концентрации спиртовых растворов остается на уровне 80 % от контроля. Экстрактивные вещества опада, полученные настаиванием, наоборот, в концентрации 6 мг/мл сдерживают развитие, показатели длины ростка и коря составляют 96 % и 65 % от контроля, а при 4 мг/мл – способствуют росту (146 и 115 % к контролю соответственно).

Влияние экстрактивных веществ листьев тополя бальзамического, полученных методом кипячения, с концентрацией 6 мг/мл, на ростовые показатели семян пшеницы Новосибирской 31 приведено в табл. 2.

При обработке семян пшеницы спирторастворимыми веществами, выделенные методом кипячения, как зеленых, так и опавших листьев в концентрации 6 мг/мл ростовые показатели семян пшеницы остаются ниже контроля. При концентрации 4 мг/л экстрактивные вещества зеленых листьев увеличивают только длину ростка (122 % к контролю), а опада – как длину ростка (137 %), так и корня (123 % к контролю).

Среди отдельных веществ экстрактов зеленых листьев, дают ростовые показатели зерна выше контроля вещества петролейного и этилацетатного экстрактов в концентрации 4 мг/мл, в опавших листьях это петролейнорастворимые вещества.

Таблица 2

Ростовые показатели семян пшеницы Новосибирская 31

Экстракт	Зеленые листья		Опад	
	средняя длина ростка, мм	средняя длина корня, мм	средняя длина ростка, мм	средняя длина корня, мм
Дистиллированная вода	38,3±5,0	66,0±5,49	38,3±5,0	66,0±5,49
Спиртовой	19,3±5,5	22,9±0,1	16,4±3,0	63,0±8,5
Петролейный	37,2±2,5	55,0±3,49	нет роста	нет роста
Диэтиловый	24,2±13,5	59,4±13,5	19,2±2,0	50,1±11,5
Этилацетатный	8,0±7,5	5,0±2,5	нет роста	нет роста
Бутанольный	36,8±16,5	62,6±12,9	2,5±2,5	5,0±5,0

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что спирторастворимые вещества, выделенные как из зеленых, так и опавших листьев тополя бальзамического влияют на рост и развитие семян пшеницы. Экстракты обладают антифунгальной активностью по отношению к грибам рода *Penicillium*. При обработке зерна зараженность снижается с 90 до 10 %, что соответствует разрешающей норме, при дальнейшем его проращивании на 23-25 % увеличивается энергия прорастания, длина ростка и корня.

#### Библиографические ссылки

1. Бакулин, В. Т. Антимикробная активность листьев тополей и ив (Salicaceae) в Сибири // Проблемы региональной экологии. 2010. № 6. С. 60-64.
2. Экстракты тополя бальзамического как регуляторы роста яровой мягкой пшеницы / Е. В. Калюта, М. И. Мальцев, О. В. Шепелева и др. // Химия растительного сырья. 2017. №4. С. 203–209.
3. Койшыбав, М. Болезни пшеницы. Анкара : Производственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО), 2018. 394 с.
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. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Введ. 1986-07-01. М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. 64 с.

#### References

1. Bakulin, V. T. Antimicrobial activity of poplar and willow leaves (Salicaceae) in Siberia // Problems of regional ecology. 2010. No. 6. S. 60-64.
2. Kalyuta E. V., Maltsev M. I., Shepeleva O. V. et al. Extracts of balsam poplar as growth regulators of spring wheat. 2017. No. 4. pp. 203–209.
3. Koishyabav, M. Diseases of wheat. Ankara: United Nations Industrial and Agricultural Organization (FAO), 2018. 394 p.
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. GOST 12038-84. Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination. Introduction 1986-07-01. M. : IPK Standards Publishing House, 2004. 64 p.

© Исаева Е. В., Мамаева О. О., Баринова Н. С., 2022

УДК 676.252.33

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ БУМАГИ

Е. В. Каплёв, В. А. Патраков, Л. В. Юртаева

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 области применения целлюлозы. Проанализированы способы получения фильтров для бензиновых, дизельных двигателей, а также для тонкой очистки авиационного топлива.*

*Ключевые слова: целлюлоза, авиационное топливо, фильтр, бумага.*

## ANALYSIS OF METHODS FOR OBTAINING FILTER PAPER

E. V. Kaplyov, V. A. Patrakov, L. V. Yurtaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2052727@mail.ru

*The article discusses the applications of cellulose. The methods of obtaining filters for gasoline, diesel engines, as well as for fine cleaning of aviation fuel are analyzed.*

*Keywords: cellulose, aviation fuel, filter, paper.*

Целлюлоза – это один из самых распространённых ресурсов в природе. Она является составной частью клеточной стенки всех высших, большинства низших растений и некоторых микроорганизмов. Естественно человечество придумало способы использования этого обширного сырья: производство бумаги и картона, получение искусственных волокон, изготовление тканей, лаков, порохов, получение глюкозы, этилового спирта и много другого. Но более распространенное применение целлюлозы нашли в производстве бумажной продукции [1].

На данный момент бумажная продукция имеет множество применений, соответственно для практически каждого из них необходимо отдельное изделие, объединённое названием и способами производства. При этом разница может быть колоссальной, так как некоторые способы для получения одного вида бумаги могут не подходить, или даже быть опасны, для других видов. Так целлюлозно-бумажная продукция продолжает расширяться, разрабатывая новые виды бумаги, более экономичные, безопасные и экологичные способы производства.

На данный момент можно выделить следующие виды бумаги: писчая, бумага для печати, чертежно-рисовальная, оберточная, крашенная, переводная, впитывающая, бумага специального назначения и так далее. При этом каждый из перечисленных видов подразделяется еще на несколько отдельных подвидов. И все также каждый подвид отличается от других способами производства и использования.

Совершенно отдельным и индивидуальным направлением в целлюлозно-бумажной промышленности можно выделить производство топливных фильтров получаемых из целлюлозы. Данный вид продукции применяется для очистки топлива бензиновых и дизельных двигателей, для тонкой очистки авиационного топлива и других гидрожидкостей, а также для спецтехники и очистки масла. Фильтрующие материалы, используемые для фильтрования воздуха, масла и топлива, в значительной степени отличаются друг от друга пористой структурой и составом по волокну.

Фильтровальная бумага представляет собой полупроницаемый бумажный барьер, расположенный перпендикулярно потоку жидкости или воздуха [2]. Она используется для отделения мелких твердых частиц от жидкостей или газов. Сырьем служат различные волокнистые полуфабрикаты, т.е. целлю-

лоза. Целлюлоза может быть выделена из древесины (хвойных, лиственных пород), волокнистых культур (однолетние растения), минеральных волокон. Одним из главных процессов в технологии изготовления фильтровальной бумаги является придание ей пористой структуры, которая обеспечивает удерживание посторонних частиц из жидкостей и газов. Данная способность бумаги обеспечивается путем однородного распределения волокон в бумаге и ее пропитки полимерным связующим веществом. Пропитка бумаги-основы осуществляется на 4-х вальном пропиточном узле из спиртовых и водных растворов с последующей сушкой. Пропитка новолачной смолой и акриловым латексом повышает прочность бумаги, ее размерную стабильность, улучшает устойчивость к растворителям и другим химическим веществам, увеличивает термоустойчивость.

Бумажную массу готовят из сульфатной небеленой целлюлозы, размолотой до степени помола 22-35 °ШР, и сульфатной мерсеризованной целлюлозы. Из этой массы на сетке бумагоделательной машины отливают бумагу. Затем эту бумагу пропитывают составом 2-5%-ной концентрации, содержащим поливинилацетатную дисперсию и гидрофобизирующее вещество. Техническим результатом является понижение гидродинамического сопротивления, достижение необходимой механической прочности, пропускной способности и влагостойкости.

В средствах очистки топлива, масла и гидрожидкостей в настоящее время широко используются фильтровальные виды бумаги и картона, основу композиции которых составляют целлюлозные волокна различной степени обработки.

Для придания данным видам бумаги и картона необходимой механической прочности, каркасности для обеспечения машинной сборки фильтрующих элементов из бумаги и повышения ее влагостойкости используется пропитка фильтровальных видов бумаги и картона спиртовыми растворами фенолоформальдегидных смол.

Известны следующие способы пропитки фильтровальных видов бумаги и картона:

- обработка фильтровальных видов бумаги и картона путем пропитки спиртовым раствором фенолоформальдегидной смолы с последующей термообработкой при температуре 140-170°C [3];
- пропитка картона для тонкой очистки смазочных масел спиртовым раствором фенолоформальдегидной смолы с содержанием свободного фенола 2% [4];
- пропитка на пропиточной машине составом, содержащим поливинилацетатную дисперсию и гидрофобизирующее вещество с целью придания бумаге необходимой механической прочности, каркасности и влагостойкости (гидрофобности) [5].

На наш взгляд, недостатком данных способов пропитки является повышенная экологическая и пожароопасность процесса вследствие выделения в окружающую среду токсичных паров фенола, формальдегида и пожароопасных паров спирта, что требует специального технологического оборудования для регенерации спирта.

В СибГУ им. М.Ф. Решетнева, на кафедре машин и аппаратов промышленных технологий ведутся исследования в области получения фильтровальной бумаги с использованием гидрогеля. Преимуществом данного способа является сокращение расходов на проведение химической обработки, продукт получается химически чистым без использования агрессивных концентрированных растворов.

В заключении можно добавить:

- что целлюлозно-бумажную продукцию используют повсеместно, в совершенно разных направлениях, даже в ракетостроении и авиационной промышленности. При этом большинство способов создания разных видов бумаги колоссально отличаются даже на самых первоначальных этапах производства, например вид сырья (древесина или однолетние растения), способ производства (сульфатный или сульфитный), технологический процесс производства целлюлозы (вид размалывающего оборудования) для разных видов бумаги;

- несмотря на большое количество способов пропитки фильтровальных видов бумаг и картона, что уже приведены на сегодняшний день, всё еще есть повышенный интерес к интенсификации и модернизации этих способов. Связано это с тем, что существующие способы обладают рядом таких недостатков, как неудовлетворительная химическая чистота, низкие экологические показатели готового продукта, сложная технология получения, использование агрессивных растворов неорганических кислот.

### Библиографические ссылки

1. Терентьева Э. П., Удовенко Н. К., Павлова Е. А. Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров: учебное пособие/ СПбГТУРП. СПб., 2014. Ч. 1. 53 с.

2. Жигadlo А.П., Серков А.П., Корнеев С.В., Буравкин Р.В. Влияние массы моторного масла, наносимого на фильтровальную бумагу, на оценку его показателей // Вестник СибАДИ. 2017. №6 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-massy-motornogo-masla-nanosimogo-na-filtrovalnuyu-bumagu-na-otsenku-ego-pokazateley>.
3. Пат. 2 055 965 С1 Российская Федерация, МПК D21F 11/14. Способ получения фильтрующих материалов / Айзенберг С.А.; заявл. 1991.11.26; опубл. 1996.03.10. 8 с.
4. Пат. 2 079 593 С1 Российская Федерация, МПК D21H 11/14. Способ изготовления фильтровальной сорбирующей бумаги / Канарский А.В.; заявл. 1994.05.12; опубл. 1997.05.20. 4 с.
5. Пат. 2 217 541 С1 Российская Федерация, МПК D21H 11/14. Способ изготовления фильтровальной бумаги / Жолобова Л.В.; заявл. 2002.05.30; опубл. 2003.11.27. 6 с.

### References

1. Terentyeva E. P., Udovenko N. K., Pavlova E. A. Chemistry of wood, cellulose and synthetic polymers: textbook/ SPbGTURP. St. Petersburg, 2014. Part 1. 53 p.
2. Zhigadlo A.P., Serkov A.P., Korneev S.V., Buravkin R.V. Influence of the mass of engine oil applied to filter paper on the assessment of its indicators // Bulletin of SibADI. 2017. No.6 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-massy-motornogo-masla-nanosimogo-na-filtrovalnuyu-bumagu-na-otsenku-ego-pokazateley>.
3. Pat. 2,055,965 C1 Russian Federation, IPC D21F 11/14. Method of obtaining filter materials / Aizenberg S.A.; application 1991.11.26; publ. 1996.03.10. 8 p
4. Pat. 2,079,593 C 1 Russian Federation, IPC D21H 11/14. Method of manufacturing filter sorbing paper / Kanarsky A.V.; application 1994.05.12; publ. 1997.05.20. 4 p
5. Pat. 2 217 541 C1 Russian Federation, IPC D21H 11/14. Method of making filter paper / Zholobova L.V.; application 2002.05.30; publ. 2003.11.27. 6 p.

© Каплёв Е. В., Патраков В. А., Юртаева Л. В., 2022

УДК 676.15

## ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ПОМОЛА ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ РАЗМОЛЕ ОДНОЛЕТНИХ РАСТЕНИЙ

А. А. Карелина\*, Ю. Д. Алашкевич

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

*В настоящее время в целлюлозно-бумажной промышленности наиболее распространенным сырьем является древесная целлюлоза. Изготовление продукции из данного материала требует большие затраты в связи с дорогостоящим воспроизводством сырья. Таким образом актуален выбор альтернативного материала с использованием однолетних растений.*

*Ключевые слова: волокнистая масса высокой концентрации, массный размол, дисковая мельница, однолетние растения.*

## DEPENDENCE OF THE DEGREE OF REFINING ON TIME IN THE REFINING OF ANNUAL PLANTS

A. A. Karelina\*, Y. D. Alashkevich

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: karelina.alexandra@mail.ru

*Currently, wood pulp is the most common raw material in the pulp and paper industry. The manufacture of products from this material requires high costs due to the expensive reproduction of raw materials. Thus, the choice of an alternative material using annual plants is relevant.*

*Keywords: high consistency pulp, bulk refining, disc mill, annuals plants.*

Защита окружающей среды является одной из самых больших проблем, стоящих перед нынешним поколением. Она приобрела актуальность в связи с неконтролируемой вырубкой лесов для производства бумаги из древесной целлюлозы. В связи с этим перед производителями остро стоит вопрос поиска альтернативного источника сырья. Одним из самых доступных ресурсов являются однолетние растения, среди которых серьезное место занимает техническая конопля.

Техническая конопля – однолетнее растение, которое вырастает за сезон до 4 и более метров в высоту. При хороших условиях скорость роста такая же как у бамбука [3].

Конопля легко приспосабливается к различным почвам, освещению и температурам. Техническую коноплю собирают на разных стадиях зрелости и даже весной после схода снега. Высокая прочность волокна позволяет производить бумагу высшего качества. Из него вырабатывается бумага для банкнот и документов, папиросная, копировальная бумага [4].

По сравнению с другими сельскохозяйственными культурами выращивание промышленных посевов технической конопли кроме универсальности способов ее реализации обладает уникальным свойством – высокой рентабельностью возделывания и переработки. Ежегодное увеличение количества используемой древесной целлюлозы привело к тому, что данная сфера современной промышленности существенно воздействует на экологическое состояние не только отдельных стран, но и целых регионов планеты [5].

Выделяя негативные факторы, влияющие на окружающую среду, можно отметить: существенный вклад в облесение; большой расход воды при производстве бумаги; большие энергозатраты; сброс воды, загрязненной твердыми частицами, растворенными органическими веществами [1].

Заинтересованность в замещении древесного сырья на конопляное решает не только экологические задачи, но и внедрение технологий, позволяющих значительно снизить себестоимость конечного продукта и соответственно получать большую добавленную стоимость, чем при производстве бумаги из древесной целлюлозы.

Помимо этого выделяются следующие причины, по которым конопляная целлюлоза может быть использована в производстве бумаги: производство бумаги из технической конопли может быть дешевле, чем из традиционного сырья, благодаря меньшему количеству затрачиваемой на производство энергии и химических веществ; в конопляном сырье содержится 65-70% целлюлозы, тогда как в древесном 40-50%; техническая конопля растет намного быстрее деревьев. Однолетнее растение готово к сбору уже через 90-120 суток, тогда как промышленной древесине требуется более 50 лет; культивирование промышленных посевов технической конопли позволяет восстановить баланс питательных веществ в почве; механические свойства растения позволяют изготавливать любые типы бумажной продукции [5].

На кафедре Машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева проводятся исследования по ножевому размолу недревесных растительных материалов в дисковых мельницах. Как правило при производстве используется концентрация 5%. На наш взгляд наиболее перспективна технология размолы волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации (10-20%). В связи с этим был произведен размол технической конопли концентрацией 18% на дисковой мельнице.

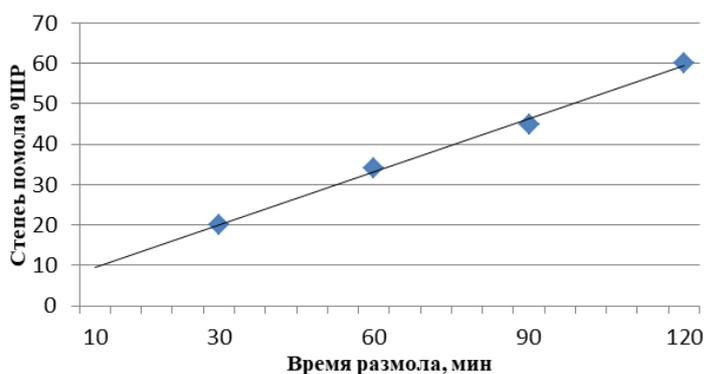


Рис. 1. График зависимости степени помола волокнистой массы от времени размолы

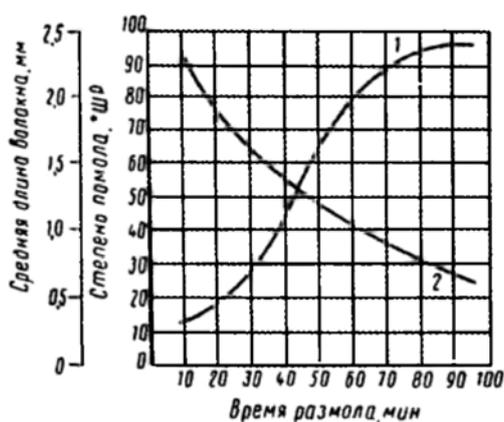


Рис. 2. Изменение степени помола массы и средней длины волокна в процессе размолы целлюлозы:  
1 – степень помола, 2 – средняя длина волокна

Судя по графику зависимости, представленному на рисунке 1, изменение степени помола по °ШР от времени размолы носит линейный характер, что в значительной мере отличается от размолы целлюлозы из древесины согласно данным Иванова С.Н [2].

На графике видно сначала незначительное повышение до 20-30 °ШР, затем наблюдается более интенсивный рост до 60 °ШР, затем наблюдается снижение интенсивности прироста степени помола. Это объясняется тем, что на начальной стадии размола идет накопление усталостных напряжений в размалываемых волокнах, затем значительный прирост степени помола, после чего интенсивность прироста степени помола снижается, что можно объяснить размолом оставшихся волокон, не подвергшихся размолу во второй стадии. Как видно график изменения прироста степени помола в значительной степени отличается при размолу технической конопли от графика размола целлюлозы из древесины. Это в значительной мере упрощает анализ процесса размола волокнистых материалов из технической конопли в отличие от зависимости размола целлюлозы из древесины.

#### Библиографические ссылки

1. Журавлева, Э. К. Целлюлозно-бумажная промышленность: вред экологии и возможная альтернатива целлюлозной бумаге / Э. К. Журавлева, Е. Д. Макаренко // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 50. С. 1679-1685.
2. Иванов С.Н. Технология бумаги. Изд. 3-е. М. : Школа бумаги, 2006. 696 с.
3. Лиходеевский, А. В. К вопросу о возрождении незаслуженно забытых технологий: техническая конопля / А. В. Лиходеевский // Теория и практика мировой науки. 2021. № 3. С. 29-38.
4. Мезенцев, И. С. Перспективы использования технической конопли / И. С. Мезенцев, И. В. Красина, А. С. Парсанов // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности . 2021. С. 173-176.
5. Новый сорт конопли посевной Роман / В.А. Серков, Р.О. Белоусов, М.Р. Александрова и др. // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 3. С. 86-89.

#### References

1. Zhuravleva, E. K. *Tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost': vred ekologii i vozmozhnaya al'ternativa tsellyuloznoy bumage* [Pulp and paper industry: harm to the environment and a possible alternative to pulp paper] / E. K. Zhuravleva, Ye. D. Makarenko // *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye*. 2022. № 50. 679-1685 p.
2. Ivanov S.N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Izd. 3-ye. M. : Shkola bumagi, 2006. 696 p.
3. Likhodeyevskiy, A. V. *K voprosu o vozrozhdenii nezasluzhenno zabytykh tekhnologiy: tekhnicheskaya konoplya* [On the issue of the revival of undeservedly forgotten technologies: industrial hemp] / A. V. Likhodeyevskiy // *Teoriya i praktika mirovoy nauki*. 2021. № 3. 29-38 p.
4. Mezentsev, I. S. *Perspektivy ispol'zovaniya tekhnicheskoy konopli* [Prospects for the use of technical hemp] / I. S. Mezentsev, I. V. Krasina, A. S. Parsanov // *Innovatsionnoye razvitiye tekhniki i tekhnologiy v promyshlennosti* . 2021. 173-176 p.
5. *Novyy sort konopli posevnoy Roman* [A new variety of cannabis sowing Roman] / V.A. Serkov, R.O. Belousov, M.R. Aleksandrova i dr. // *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal*. 2021. № 3. 86-89 p.

© Карелина А. А., Алашкевич Ю. Д., 2022

УДК 676.1

## ПЕРОКСИДНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА ИЗ КОНОПЛИ

Н. В. Каретникова

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

*Проведена делигнификация стеблей конопли пероксидом водорода и перуксусной кислотой. Получены полуфабрикаты с выходом от 55 до 71 %. Изучены свойства волокнистых полуфабрикатов.*

*Ключевые слова: делигнификация, конопля, пероксид водорода, перуксусная кислота, катализатор, физико-механические свойства.*

## HEMP PEROXIDE CELLULOSE

N. V. Karetnikova

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

*Hemp stems were delignified hydrogen peroxide and peracetic acid. Semi-finished products with yield from 55 to 71% are obtained. Properties of fibrous semi-finished products are studied.*

*Keywords: delignification, hemp, hydrogen peroxide, peracetic acid, catalyst, physical and mechanical properties.*

Начиная с 17 века Россия была основным поставщиком технической конопли в Европу. Промышленность СССР получала из этого сырья пеньку и масло, что являлось одним из источников валюты. С 1987 года выращивание конопли было полностью запрещено, в целях борьбы с наркотическими веществами. В современной России отрасль выращивания технической конопли восстанавливается, в связи с чем, научные исследования по переработке стеблей конопли становятся актуальными.

Сегодня из ненаркотической конопли получают ткани, бечевки, канаты, фармацевтические и косметические препараты, масло. Отходы переработки – костру, применяют для армирования бетона и получения древесно-волокнистых плит. В ряде работ рассмотрены проблемы и возможности получения технической целлюлозы из стеблей конопли [1]. На кафедре МАПТ СибГУ им. М.Ф. Решетнева проводятся исследования по получению волокнистых полуфабрикатов из однолетних растений – соломы и костры льна окислительными методами делигнификации [2-4]). В настоящее время предметом изучения является конопля.

В процессе промышленной переработки конопли происходит разделение стебля на внутреннюю часть (костра) и внешнюю часть (пенька). В эксперименте сырье дополнительно измельчалась до частиц размеров 3...5 мм. В табл. 1 приведены результаты химического анализа костры и пеньки (массовые доли компонентов определяли общеизвестными методами [5]).

В ходе эксперимента волокнистые полуфабрикаты получали перуксусным и пероксидным способами. Для перуксусной варки исходный состав варочного раствора – массовая доля «ледяной» уксусной кислоты 0,65; массовая доля пергидроля 0,35; концентрация катализатора (вольфрамата натрия) 0,03 г-моль/дм<sup>3</sup>. Жидкостный модуль – 6, продолжительность варки в изотермических условиях 90 мин. при температуре 92 °С. Для пероксидной варки начальная концентрация пероксида водорода 17 %. Концентрация комплексного катализатора 0,1 г-моль/дм<sup>3</sup> (мольные доли Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в составе катализатора соответственно 0,3:0,3:0,4). Жидкостный модуль – 6, продолжительность варки в изотермических условиях 105 мин. при температуре 98 °С.

Таблица 1

Результаты анализа химического состава сырья (%)

Компоненты	Пенька	Костра
Целлюлоза	67,7	43,7
Лигнин	5,6	18,1
Пентозаны	15,5	21,7
Экстрагируемые вещества:		
- в горячей воде;	7,9	6,5
- орг. растворителями	0,5	1,5
Зола	2,7	1,6

Образцы целлюлозы размалывали в центробежном размалывающем аппарате (ЦРА). Из размолотых полуфабрикатов изготавливали отливки массой 75 г/м<sup>2</sup> и испытывали их по стандартным методикам. В табл. 2 приведены физические свойства целлюлозы и отливок, в табл. 3 – механические свойства отливок. Для сравнения в табл. 2 и 3 представлены нормы ГОСТ 28172-89 «Целлюлоза сульфатная беленая из смеси лиственных пород древесины» для марки ЛС-4.

Таблица 2

Свойства целлюлозы и отливок

Вид целлюлозы и сырья	Выход из сырья, %	Продолжительность размола до 45-50 °ШР	Свойства отливок		
			толщина, мм	плотность, г/см <sup>3</sup>	белизна, %
Перуксусная пенька	71,4	12	0,13	0,59	85,0
Пероксидная пенька	66,5	22	0,13	0,59	85,0
Перуксусная костра	55,6	3	0,12	0,57	89,0
Пероксидная костра	61,5	4	0,13	0,66	89,0
ЛС-4	52,0-54,0*	не норм	не норм	не норм	80,0

\*По данным ведомственных норм технологического проектирования предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, 1986.

Таблица 3

Механические свойства отливок из целлюлозы

Вид целлюлозы и сырья	Разрывная длина, км	Сопротивление	
		продавливанию, кПа	излому, ч.д.п.
Перуксусная пенька	3,8	159	20
Пероксидная пенька	3,9	164	60
Перуксусная костра	8,1	255	1
Пероксидная костра	9,5	265	1
ЛС-4	6,0	не норм.	не норм.

Результаты эксперимента показали, что выходы полуфабрикатов, полученных из пеньки на 5...10 % выше, чем выходы полуфабрикатов из костры, что объясняется меньшей долей целлюлозы и большей долей лигнина в костре. При этом выходы всех полуфабрикатов из конопли существенно выше выхода древесной целлюлозы, получаемой традиционной сульфатной варкой. Поскольку пероксид водорода и перуксусная кислота применяются для отбеливания технической целлюлозы, белизна полученных образцов 85...89 %. Для получения степени помола 45...50 °ШР полуфабрикатов из костры конопли потребовалось 3...4 мин., для полуфабрикатов из пеньки 12...22 мин.

Разрывная длина отливок из костры превышает значения отливок из пеньки и сравнима по данному показателю с сульфатной древесной целлюлозой. Вследствие малой длины волокон, отливки из

костричной целлюлозы выдерживают не более 1 двойного перегиба, а образцы из пеньки от 20 до 60. Однако это не исключает возможность применения данных полуфабрикатов, например, в композиции бумаги бытового и санитарно-гигиенического назначения.

#### Библиографические ссылки

1. Чурсина Л. А., Лялина Н. П., Шудрик И. В. Проблемы и перспективы получения целлюлозы из безнаркотической конопли. URL: [http://www.rusnauka.com/SND/Agricole/4\\_chursina.doc.htm](http://www.rusnauka.com/SND/Agricole/4_chursina.doc.htm) (дата обращения: 08.09.2022).
2. Пен Р. З., Каретникова Н. В., Шапиро И. Л. Катализируемая делигнификация растительного сырья пероксидом водорода и пероксикистотами (обзор) // *Химия растительного сырья*. 2020. № 4. С. 329-347.
3. Каретникова Н. В., Чендылова Л. В., Пен Р. З. Делигнификация льняной костры // *Химия растительного сырья*. 2018. №1. С. 155-162.
4. Пен Р. З., Шапиро И. Л., Каретникова Н. В. Пероксидная целлюлоза из пшеничной соломы // *Химия растительного сырья*, 2022. №2. С. 299-305.
5. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.

#### References

1. Chursina L. A., Lyalina N. P., Shudrik I. V. [Problems and prospects for producing cellulose from drug-free hemp]. Available at: [http://www.rusnauka.com/SND/Agricole/4\\_chursina.doc.htm](http://www.rusnauka.com/SND/Agricole/4_chursina.doc.htm) (accessed date: 08.09.2022).
2. Pen R. Z., Karetnikova N. V., Shapiro I. L. [Kataliziruemaya delignifikaciya rastitel'nogo sy'r'ya peroksidom vodoroda i peroksikistotami (obzor)]. *Ximiya rastitel'nogo sy'r'ya*. 2020, No 4, P. 329-347 (In Russ.).
3. Karetnikova N. V., Chendylova L. V., Pen R.Z. [Delignification of linen fire]. / *Ximiya rastitel'nogo sy'r'ya*. 2018, No. 1, P. 155-162 (In Russ.).
4. Pen R. Z., Shapiro I. L., Karetnikova N. V. [Peroxide cellulose from wheat straw]. *Ximiya rastitel'nogo sy'r'ya*. 2022, No 2? P. 299-305.
5. Obolenskaya A. V., Elnitskaya Z. P., Leonovich A. A. *Laboratornye raboty po himii drevesiny i cellyulozy*. [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. M.: Ecology, 1991. 320 p.

© Каретникова Н. В., 2022

УДК 676.019

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ БУМАГИ

Е. Р. Колосова, Д. Ю. Васильева, Л. В. Юртаева

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 показано значение бумаги для различных отраслей промышленности и ракетостроения. Проанализированы факторы оказывающие влияние на механическую прочность бумаги.*

*Ключевые слова: целлюлоза, древесина, однолетние растения, бумага.*

## FACTORS AFFECTING THE MECHANICAL STRENGTH OF PAPER

E. R. Kolosova, D. Y. Vasilyeva, L. V. Yurtaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2052727@mail.ru

*The article shows the importance of paper for various industries and rocket science. The factors influencing the mechanical strength of the paper are analyzed.*

*Keywords: cellulose, wood, annual plants, paper.*

Бумажные изделия уже давно стали неотъемлемой частью нашей жизни. Их существует огромное количество. В ходе многовековой истории производства бумаги ее значение в нашей жизни неизмеримо возросло, беспредельно расширились ее возможности. Сохраняя верность своей древней профессии – поддерживать общение между людьми, сообщать им новости, помогать в приобретении знаний, в развитии культуры и науки, бумага обнаружила способность успешно выступать в новых областях и в новом качестве. Семейство бумаги насчитывает тысячи различных видов, разновидностей и сортов. И каждому из них находится место, где любой другой материал будет уступать бумаге.

В современном мире без бумаги, картона, равно как без других видов продукции, получаемой целлюлозно-бумажной промышленностью путем химической переработки древесины, не обходится ни одна отрасль производства. Бумагу охотно берут себе в помощники металлурги и машиностроители, нефтяники и пищевики, химики и медики, строители и работники торговли.

На бумаге воспроизводят результаты своей работы электронные вычислительные машины. Она широко используется в приборах и устройствах, обеспечивающих жизнедеятельность космических кораблей, искусственных спутников Земли, в системах ракет, которые выводят их на орбиту [1, 2].

Не зависимо от отрасли, в которой используются бумажные изделия, все они характеризуются комплексом физико-механических характеристик, которые определяют реакцию бумаги на различные воздействия на нее в производстве полиграфической продукции. В связи с этим, при производстве бумаги необходимо учитывать различные факторы и в первую очередь это вид сырья. В целлюлозно-бумажной промышленности для выделения целлюлозы используются следующие виды сырья: древесина, тростник, однолетние растения (солома злаков, стебли хлопчатника, льна, кукурузы, конопля), тряпье, льнопеньковые и хлопковые отходы, макулатура, полуцеллюлоза (волоконный полуфабрикат, получаемый неглубокой варкой растительного сырья с последующим размолом и выходом 65-75 % за счет меньшего удаления), асбест (горный лен), шерсть и другие волокна. Несмотря на такое многообразие сырья, тем не менее, основным источником для получения целлюлозы остается древесина. Она состоит на 50 % из целлюлозы. Содержание целлюлозы в волосках семян хлопчатника 97-98%, в стеблях лубяных растений (лён, рами, джут) 75-90%, камышах, злаках, подсолнечнике 30-40%.

Во вторых – строение волокон. При производстве бумажной продукции, для того, чтобы получить у изделия с необходимыми физико-механическими характеристиками, важно учитывать и строение волокна используемого в производстве бумаги сырья. Например, волокна твердых пород древесины (дуб, клен, ясень, осина, тополь), как правило, обеспечивают непрозрачность, пухлость, воздухопроницаемость и впитывающую способность готовой продукции. Волокна мягких пород (кедр, ель, пихта, сосна), наоборот, придают бумаге относительно более высокую прозрачность, плотную структуру и высокие показатели сопротивления разрыву. При этом волокна хвойной древесины достаточно длинные и отличаются большей склонностью к хлопьеобразованию. Поэтому добавка в массу из хвойной целлюлозы полуфабрикатов с меньшей длиной волокна уменьшает хлопьеобразование и улучшает структуру изготавливаемого материала [3].

Стебель однолетних растений состоит из трех основных слоев: коры, древесины и сердцевины. Слой коры приблизительно в три раза тоньше древесины и сердцевины, вместе взятых. Под тонким наружным слоем коры, называемым эпидермисом, лежит коровая паренхима. В паренхиме залегают лубяные волокна, которые вместе с пектиновыми и другими веществами образуют соединительную ткань, придающую стеблю повышенную упругость. Чтобы извлечь волокна из стебля, разрушают пектиновые вещества, соединяющие эти волокна с другими тканями стебля. При этом древесина стебля изламывается на отдельные частицы – пеньку (короткое волокно) и костру (длинное волокно). Целлюлозу, полученную из однолетних растений применяют, как правило, только в композиции с древесной массой.

В третьих – это способ производства целлюлозы. Для производства целлюлозы в настоящее время используются в основном два способа: сульфитный и сульфатный, причем второй способ получает преимущественное распространение, так как допускает использование более разнообразных видов сырья [4].

В четвертых – стадии технологического процесса (механический и химический). Механическим способом получают древесную массу. Древесная масса – волокнистый полуфабрикат для изготовления бумаги, который получают путём механического перетирания древесины в водной среде. Это наиболее экономичный полуфабрикат с содержанием природного сырья. Кроме того, производить древесную массу проще и дешевле, чем целлюлозу. В результате получается меньше отходов, которые загрязняют окружающую среду. Бумага, изготовленная на основе такой целлюлозы, непрочна и чаще всего идет на производство, например, газет, картона.

Бумагу более высокого качества делают из целлюлозы, полученной химическим способом: баланс рубится на малые щепы, которые погружаются в химический раствор и нагреваются под давлением. Далее, полученная целлюлоза проходит стадию отбеливания, размола и подается на бумагоделательную машину. Из такой древесной массы изготавливают бумагу для книг, брошюр и модных журналов, а также прочные оберточные материалы.

Таким образом, можно сделать вывод, что факторами, оказывающими влияние на прочность бумаги, являются: прочность и длина исходных волокон; гибкость и эластичность волокон; отношение длины волокна к диаметру; степень и характер переплетения волокон между собой; степень фибрилляции или изменения внешней поверхности волокон; степень уплотнения листа; равномерность отлива листа; наличие в бумаге веществ неволокнутого характера, которые способствуют либо увеличению, либо уменьшению прочности бумажного полотна; наличие или отсутствие в бумажной массе целлюлозной слизи; влияние каждой ступени технологического процесса производства бумаги (например, варка целлюлозы, размол волокнистой массы, проклейка, наполнение, отлив, сушка, каландрирование и др.); условия хранения волокнутого сырья; состав солей жесткости производственной воды [5].

### Библиографические ссылки

1. Сквернюков П. Ф. *В мире говорящих листков*. М.: Знание, 1990. 192 с.
2. Чу Конг Нгы, Хоанг Минь Кхоа *Параметры размола и их роль в определении бумагообразующих свойств целлюлозы* // Московский экономический журнал. 2018. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-razmola-i-ih-rol-v-opredelenii-bumagoobrazuyuschih-svoystv-tsellyulozy> (дата обращения: 29.06.2022).
3. Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., Окулова Е.О. *Влияние фибрилляции и укорочения волокон при размолу на характеристики прочности, реформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов* // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2018. №2 (262).

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-fibrillirovaniya-i-ukorocheniya-volokon-pri-razmole-na-harakteristiki-prochnosti-reformativnosti-i-treschinostoykosti> (дата обращения: 30.08.2022).

4. Момзякова К. С. Совершенствование технологии получения целлюлозы из травянистых растений. Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Момзякова Ксения Сергеевна. Казань, 2021. 150 с.

5. Иванов С.Н. *Технология бумаги* / С.Н. Иванов 3-е изд. М.: Школа бумаги, 2006 696 с.

### References

1. Skvernyukov P. F. In the world of talking leaflets. М.: Znanie, 1990. 192 p.

2. Chu Kong Ngyi, Hoang Minh Khoa Grinding parameters and their role in determining the paper-forming properties of cellulose // Moscow Economic Journal. 2018. No.4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-razmola-i-ih-rol-v-opredelenii-bumagoobrazuyuschih-svoystv-tsellyulozy> (accessed: 06/29/2022).

3. Gorazova V.V., Dernova E.V., Dulkan D.A., Okulova E.O. The effect of fibrillation and shortening of fibers during grinding on the characteristics of strength, reformativity and crack resistance of cellulose materials // Izvestiya VUZOV. Forest magazine. 2018. №2 (262). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-fibrillirovaniya-i-ukorocheniya-volokon-pri-razmole-na-harakteristiki-prochnosti-reformativnosti-i-treschinostoykosti> (accessed: 30.08.2022).

4. 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.

5. Ivanov S.N. Paper technology / S.N. Ivanov 3rd ed. Moscow: School of Paper, 2006 696 p.

© Колосова Е. Р., Васильева Д. Ю., Юртаева Л. В., 2022

УДК 674.816.2

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ ОТХОДОВ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ

А. Ю. Лопатин, А. Е. Тюменцева, 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: 16alekseylapatin1999@mail.ru

*В работе представлены результаты изучения использования отходов древесного сырья для создания композиционных материалов.*

*Ключевые слова: отходы, композит, переработка, древесное сырье, кора, опилки, экологически безопасные материалы.*

## COMPOSITE MATERIALS FROM WASTE WOOD RAW MATERIALS

A. Yu. Lopatin, A. E. Tyumentseva, V. D. Eskin, A. I. Krivorotova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 16alekseylapatin1999@mail.ru

*The paper presents the results of studying the use of waste wood raw materials for the creation of composite materials.*

*Keywords: waste, composite, recycling, wood raw materials, bark, sawdust, environmentally friendly materials.*

Процесс лесозаготовки, деревообработки и вторичного использования древесного материала связан с образованием разнообразных по форме и составу отходов древесины. Практически все современные процессы переработки древесного сырья включают в себя операцию пиления древесины. В результате образуется достаточно большое количество мягких отходов древесины примерно одинакового фракционного состава. Кроме этого источником древесных отходов являются лесопарки и зеленые насаждения городов, которые периодически подвергаются санитарной вырубке и чистке. Полезное применение находят не более половины таких остатков древесины. Ценный природный материал просто сгнивает без попыток утилизации. Однако своевременные технологии утилизации отходов древесины способны улучшить экологическую ситуацию многих регионов, создать дополнительные рабочие места, сохранить лесные массивы. Поэтому вопрос утилизации древесных отходов и вторичное использование древесного материала с каждым годом становится актуальнее и имеет приоритетное значение на административном уровне большинства регионов [1].

Наиболее эффективными направлениями использования отходов являются производство целлюлозы и технологической щепы для изготовления древесных плит из измельченной древесины, а также использование неликвидной древесины и отходов в качестве топлива.

Переработка отходов деревоперерабатывающих производств древесины, включающих отходы окорки древесного сырья, является перспективным направлением разработки новых композиционных материалов, обладающих высокими физико-механическими свойствами.

Для создания композиционных материалов без связующих веществ можно использовать различные виды отходов древесного сырья. Тем более что вид отходов может существенно расширить область применения композиционных материалов, так как в зависимости от состава отходов меняются свойства получаемых композитов. Какие отходы возможно использовать?

На заготовительных полигонах остаются без переработки следующие виды сырья: корни и пни; ветви и сучья; мелкая древесная зелень; опилки и стружка; кора и верхушки. Более половины товарного круглого леса, заготовленного в России, идет на изготовление пиломатериалов и фанеры. Эти

два материала в большей степени востребованы, как на внутреннем, так и на мировом рынке. При изготовлении пиломатериалов в среднем до 50% объема круглых лесоматериалов уходит в отходы, а в фанерном производстве отходы превышают половину объема лесоматериалов и достигают 65 – 70%. Стоит отметить, что древесные остатки являются ценным источником сырья для повторной переработки с целью получения изделий и материалов различного назначения. Их переработка послужит экономии природных ресурсов и решению экологических проблем [2].

Особенно интересным сырьем для переработки в современные композиты являются кора и шишка. Данный вид отходов перерабатывается малоэффективно. С 1964 года известна технология производства изоляционных плит из коры, где в качестве связующего выступает бардяной концентрат, который в свою очередь является отходом производства целлюлозы [3]. Кора также используется в качестве основного сырья при изготовлении королита [4]. Известны способы изготовления топливных брикетов из отходов окорки и мелких отходов механической обработки древесины [5]. Отходы древесной шишки, которые образуются на лесозаготовках и семязготовительных предприятиях вообще не находят широкого применения. Самым известным способом переработки древесной шишки, является производство композиционного материала «Кедропласт». В состав этого материала входит скорлупа кедрового ореха, шелуха кедровой шишки и смола кедра в качестве связующего элемента. Наибольшее распространение кедропласт получил в медицине. Из кедропласта изготавливают лечебные кабины и капсулы [6].

Проведенный обзор позволяет сделать вывод, что в настоящее время возможность и необходимость использования отходов древесного сырья, актуальна в производстве строительных материалах, что позволит получить экологически безопасные материалы.

#### Библиографические ссылки

1. PROMZN.RU [Электронный ресурс]. URL: <https://promzn.ru/derevoobrabotka/pererabotka-drevesnyh-othodov.html> (дата обращения: 07.09.2022).
2. PROMZN.RU Промышленный портал [Электронный ресурс]. URL: <https://promzn.ru/derevoobrabotka/pererabotka-drevesnyh-othodov.html#:~:text=Во%20время%20переработки%20отходов%20лесопиления,ситуация%20региона%2C%20где%20расположено%20производство> (дата обращения: 07.09.2022).
3. Цыбульский Л. М. Свойства древесных плит из отходов окорки сосновой древесины // МОД. 1971. №3. С. 10.
4. Пинджоян М. Л. Королит новый строительный материал // Лесная промышленность 1969. № 10. С. 13.14.
5. Зыков Ф. И. Подготовка древесной коры к сжиганию. М. : 1971.38 с
6. Патент № 2343078 Российская Федерация, МПК51С2 В44С 5/04(2006.01), В44С 1/24 (2006.01). Способ получения декоративных изделий из отходов кедровых шишек: № 2006125261: заявл.13.07.2006: опубл. 10.01.2009 / Степченко В. М. 5.6

#### References

1. PROMZN.RU. Available at: <https://promzn.ru/derevoobrabotka/pererabotka-drevesnyh-othodov.html> (accessed: 07.09.2022).
2. PROMZN.RU. Available at: <https://promzn.ru/derevoobrabotka/pererabotka-drevesnyh-othodov.html#:~:text=Во%20время%20переработки%20отходов%20лесопиления,ситуация%20региона%2C%20где%20расположено%20производство> (accessed: 07.09.2022).
3. Tsybulsky L. M. Properties of wood slabs from the waste of debarking pine wood // MOD. 1971. No. 3.P. 10.
4. Pinjoyan M. L. Korolit a new building material // Forest industry 1969. No. 10. p. 13.14.
5. Zykov F. I. Preparation of tree bark for burning. M. : 1971.38 s
6. Stepchenko V. M. Method of obtaining decorative products from cedar cones waste Patent RF, no. 2343078, 2006

УДК 676.054.1

## ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУМАГИ ОТ ВИДА НОЖЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГАРНИТУРЫ

А. А. Петрова\*, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич, Д. Е. Зырянов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
\*E-mail: www.sss19951@gmail.com

*В данной статье рассматривается влияние характера конической и волнообразной межножевой размольной полости комбинированной гарнитуры на физико-механические характеристики готового продукта.*

*Ключевые слова: размалывающая гарнитура, дисковая мельница, размол, волокна, волокнистый полуфабрикат.*

## DEPENDENCE OF PHYSICAL AND MECHANICAL INDICATORS OF PAPER ON THE TYPE OF THE KNIFE SURFACE OF THE GRINDING SET

A. A. Petrova\*, I. A. Voronin, Yu. D. Alashkevich, D. E. Zyryanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: www.sss19951@gmail.com

*In this article considered the influence of the characteristics conical and wavy inter-knife grinding cavity of the combined set on the physical and mechanical characteristics of the finished product.*

*Keywords: grinding set, disc mill, grinding, fibers, fibrous semi-finished product.*

Бумага является неотъемлемой частью различных сфер жизнедеятельности общества. В настоящий момент наблюдается устойчивая тенденция роста затрат на изготовление бумажной продукции как на этапе производства готового продукта, так и при подготовке полуфабрикатов. Подготовка волокнистого сырья к отливу, а именно его размол до соответствующих показателей, является наиболее энергозатратной операцией целлюлозно-бумажного производства.

Изучению и развитию процесса размола посвящено множество работ отечественных и иностранных исследователей [1-4]. Анализируя работы приведенных авторов можно прийти к выводу, что основной целью размола является разработка волокна в продольном и поперечном направлении, что повышает бумагообразующие характеристики подготавливаемой массы и обеспечивает требуемые показатели готового бумажного листа.

С целью исследования влияния различных ножевых поверхностей на характер обработки волокнистых полуфабрикатов на кафедре «Машин и аппаратов промышленных технологий» Сибирского государственного университета имени академика М.Ф. Решетнева была спроектирована и изготовлена наборная гарнитура, общий вид которой представлен на рисунке 1. Размольная гарнитура состоит из пяти концентрических колец ротора и статора, второе и четвертое являются взаимозаменяемыми, что позволяет создавать волнообразную или же коническую размольную полость [5].

Для исследований процесса размола была выбрана беленая сульфатная хвойная целлюлоза производства ОАО «Группа «Илим» г. Братск. Размол производился при концентрации волокнистой массы 2%, межножевом зазоре 0,2 мм, частоте вращения ротора 2000 об/мин, для сравнения была выбрана коническая и волнообразная форма межножевой полости с прямолинейной формой ножей.

Сопротивление разрыву является важным показателем качества готовой бумаги. На рисунке 2 представлена зависимость разрывной длины от степени помола. Из графика можно отметить, что до

50 °ШР зависимости близки друг к другу, далее после 50 °ШР и до завершения размола интенсивность повышения разрывной длины у волнообразной полости выше, чем у конической.

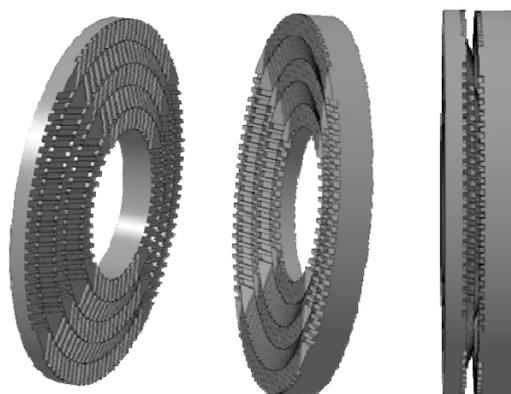


Рис. 1. Наборная размалывающая гарнитура

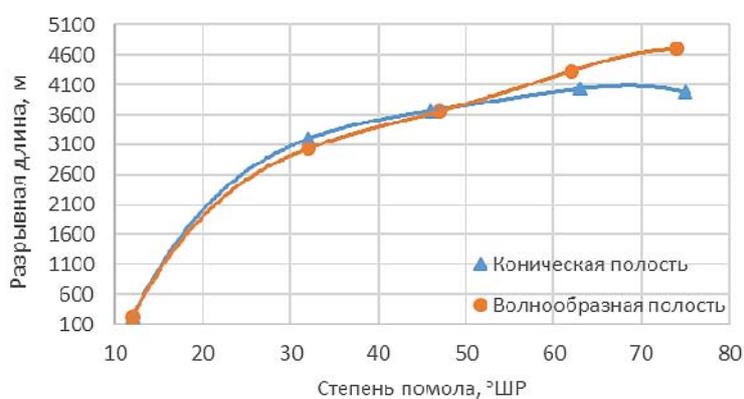


Рис. 2. График зависимости разрывной длины от степени помола

На рисунке 3 представлена зависимость числа двойных перегибов от степени помола. Как видно из графика при использовании гарнитуры с волнообразной полостью наблюдается повышение этого показателя до завершения размола. При использовании конической полости гарнитуры изменение числа двойных перегибов осуществляется по параболической зависимости и от 50 °ШР до завершения размола величина числа двойных перегибов ниже, чем для волнообразной полости.

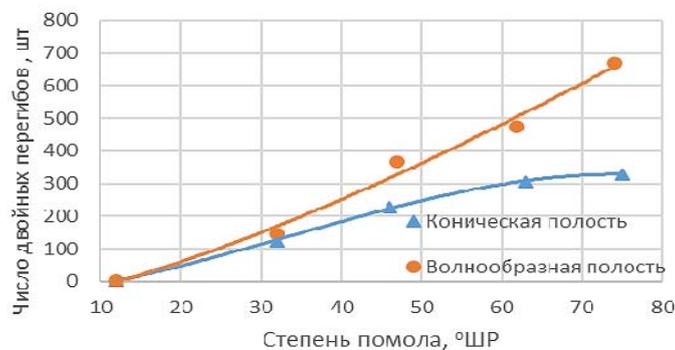


Рис. 3. График зависимости сопротивления смятию от степени помола

В ходе проведенных исследований было выявлено, что физико-механические характеристики отличаются при использовании различного вида рисунков гарнитуры. Для показателя разрывной длины

от степени помола наблюдается незначительное отличие зависимости разрывной длины от степени помола по Шоппер-Риглеру, что же касается числа двойных перегибов, то как видно из рисунка 3 наблюдается более значительные изменения для двух видов рисунка гарнитуры, причем число двойных перегибов для рисунка гарнитуры волнообразной полости имеет более высокий показатель, чем для конической полости гарнитуры.

#### Библиографические ссылки

1. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. докт. техн. наук / Ю.Д. Алашкевич. Красноярск 1986 г.
2. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.
3. Примаков С.Ф. Производство бумаги. М.: Лесн. Пром-сть, 1987. 224 с
4. Steenberg B. Review of the Effect of Mechanical Treatment of Fibres // Svensk Papperstidning. 1963. V. 66. № 22. P. 933-939
5. Патент № 2314380 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы : № 2006121708/12 : заявл. 19.06.2006 : опубл. 10.01.2008 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, М. А. Карбышев [и др.] ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный технологический университет".

#### References

1. Alashkevich Yu.D. Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nykh mashinakh: dis. dokt. tekhn. nauk / Yu.D. Alashkevich. Krasnoyarsk 1986 g.
2. Ivanov, S. N. Tekhnologiya bumagi / S. N. Ivanov M.: Shkola bumagi, 2006. 696 s.
3. Primakov S.F. Proizvodstvo bumagi. M.: Lesn. Prom-st', 1987. 224 s
4. Steenberg B. Review of the Effect of Mechanical Treatment of Fibres // Svensk Papperstidning. 1963. V. 66. № 22. P. 933-939
5. Patent № 2314380 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK D21D 1/30, B02C 7/12. Razmalyvayushchaya garnitura diskovoy mel'nitsy : № 2006121708/12 : zayavl. 19.06.2006 : opubl. 10.01.2008 / Yu. D. Alashkevich, V. I. Kovalev, M. A. Karbyshev [i dr.] ; zayavitel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Sibirskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskij universitet".

© Петрова А. А., Воронин И. А., Алашкевич Ю. Д., Зырянов Д. Е., 2022

УДК 676.252.2

## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАКУЛАТУРЫ

М. М. Попова, Е. А. Слизикова, Н. Н. Токоякова, Р. А. Марченко, В. И. Шуркина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: popova.210618@gmail.com

*В статье рассмотрены преимущества и недостатки использования макулатуры.*

*Ключевые слова: вторичное сырье, газетная макулатура, экологичность.*

## THE MAIN ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF USING WASTE PAPER

M. M. Popova, E. A. Slizikova, N. N. Tokoyakova, R. A. Marchenko, V. I. Shurkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: popova.210618@gmail.com

*The article discusses the advantages and uses of waste paper.*

*Keywords: secondary raw materials, newspaper waste paper, environmental friendliness.*

Макулатура – категория отходов, которая занимает лидирующие позиции в рейтинге наиболее популярных среди утилизируемого мусора. Изделия из бумаги, картона использует практически каждый житель планеты. Когда материалы этой категории теряют свойства, форму, то отправляются в мусорное ведро. После попадания на свалку реанимировать макулатуру сложно.

В настоящее время в мировом производстве бумаги и картона доля макулатуры в общем балансе волокна (без учета не волокнистых компонентов) превышает 50 %. Исторический барьер (более 50 %), был преодолен в конце первого десятилетия XXI века. При этом в некоторых источниках указывается, что макулатура в настоящее время покрывает потребность в волокне на 53 % и даже на 55 %. Доля макулатуры в общем балансе волокнистого сырья будет практически сохраняться на достигнутом уровне (50÷55 %) с возможным увеличением этой доли примерно до 60 %.

Основной причиной повышения уровня регенерации макулатуры является экологическая политика, направленная на сохранение биоресурсов, а также на снижение количества твердых отходов и, в частности, на утилизацию картонно-бумажных отходов. Второй важной причиной повышения использования макулатурного сырья является значительно более низкая его стоимость по сравнению с первичным волокном, что позволяет сдерживать повышение цен на продукцию при постоянном росте производственных издержек [1, 2].

Основные преимущества, стимулирующие рост использования макулатурного сырья, заключаются в следующем:

1. Ресурсосбережение. Примерно 50÷60 кг макулатуры сохраняет от вырубки одно дерево, которое вырастает до деловой спелости в течение 50÷60 лет. Замена 1 тонны первичного целлюлозного волокна макулатурой дает экономию 2÷3 м<sup>3</sup> древесины. Это позволяет сократить вырубку лесов, исключает затраты на заготовку, доставку и восстановление леса. Кроме того, производства, перерабатывающие макулатуру, потребляют меньше воды, топлива и химикатов, чем производства полного цикла.

2. Экономичность. Средняя цена одной тонны макулатуры на сегодня составляет 100÷200 долл. США, что в 2÷4 раза дешевле 1 т целлюлозы. Так как в себестоимость продукции включается (до 30 %) стоимость сырья, то использование макулатуры позволяет значительно снизить этот показатель.

3. Относительно низка капиталоемкость предприятий. Удельные капитальные затраты по созданию новых мощностей по переработке макулатуры составляют 250÷350 тыс. долл. США на 1 т суточной мощности, против 500÷1000 тыс. долл. на 1 т в сутки для предприятий, работающих на выпускаемой ими целлюлозе.

4. Районированность. Предприятия, использующие в качестве сырья макулатуру, располагаются в промышленно развитых районах, где образуются основные ресурсы макулатуры, имеются развитая инфраструктура, квалифицированные кадры и находится основная масса потребителей картонно-бумажной продукции.

5. Экологичность. Использование макулатуры, вывозимой на свалки, может на четверть уменьшить объем твердых бытовых отходов в густонаселенных регионах и крупных городах, что приведет к сокращению объемов городских свалок и, соответственно, к снижению затрат и потребности в оборудовании для переработки отходов. В настоящее время городские свалки содержат около 25 % (по массе) отходов бумаги и картона.

6. Цикличность. Возможность многократного (до 5-6 циклов) использования макулатуры.

Отмечая преимущества, получаемые от использования макулатуры, следует учитывать и ряд недостатков и проблем, сдерживающих этот процесс сейчас и в перспективе.

Основные из них сводятся к следующему:

1. Качество продукции. Как правило, качественные характеристики продукции, изготовленной из макулатурного сырья, ниже, чем изготовленной из первичного волокна. Улучшение качественных характеристик продукции возможно, но это требует дополнительных затрат.

2. Качество макулатуры. В целом, наблюдается постепенное ухудшение качества макулатурного сырья, так как в производство поступает макулатурное волокно, ранее неоднократно прошедшее полный технологический цикл бумажного производства.

3. Образование отходов. Переработка макулатуры сопровождается образованием и необходимостью утилизации большого количества отходов, содержащихся в макулатуре в виде загрязнений. Также усложняется процесс очистки воды и производственных стоков.

Помимо указанных общих проблем имеется и ряд проблем, характерных для отечественной бумажной промышленности. Основные из них:

1. Дефицит вторичного волокна, объясняемый, прежде всего низким объемом производства и потребления бумаги и картона, которое составляет около 50 кг/год на душу населения.

2. Морально устаревший и физически изношенный парк основного оборудования при отсутствии эффективных отечественных аналогов. Устаревшие (свыше 30 лет) бумагоделательные машины составляют около 75 % парка.

3. Ограниченность ассортимента выпускаемой из макулатуры продукции тормозит развитие и распространение новых перспективных технологий ее переработки.

4. Несовершенство систем сбора и сортирования вторичного сырья, приводящее к повышенной загрязненности макулатуры инородными включениями, затрудняющими ее переработку.

5. Большое количество мелких (менее 20 тыс. т в год продукции) предприятий, использующих макулатуру, где высокая себестоимость продукции влияет на её рыночную конкурентоспособность/

Всё это вместе делает проблему использования и переработки макулатуры чрезвычайно острой и актуальной [2-4].

В лаборатории кафедры «Машины и аппараты промышленных технологий» СибГУ им. М. Ф. Решетнева проводятся лабораторные исследования процесса размола волокнистых полуфабрикатов, с целью повышения качественных показателей использования вторичного волокнистого материала при производстве бумаги. В зависимости от вида волокнистого материала можно получить массу имеющую различные бумагообразующие показатели волокна, которые как известно влияют на процесс листообразования бумажного полотна, а качество последнего в свою очередь определяется физико – механическими характеристиками [4, 5].

#### Библиографические ссылки

1. Мороз В.Н., Сызранова Н.М. Новое в использовании вторичных волокнистых материалов // Целлюлоза. Бумага.Картон.-1992.-№2.-с.13-14.

2. Макулатура эффективное сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Целлюлоза. Бумага. Картон.: Экспрессинформ. М.: ВНИПИЭИ Леспром, 1992. №6. с.2-10.

3. Пузырев С.С. Ресурсосберегающая технология переработки макулатуры // Журнал профессионалов ЛПК. ЛесПромИнформ. 2006. №3 (34).
4. Слизикова Е.А. Будущее целлюлозно-бумажной промышленности: рециклинг // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. CVI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 10(105). Новосибирск, 2021. 161 с.
5. Муравицкая А.А. Влияние вида обработки на размол различного волокнистого материала / А.А. Муравицкая, Р.А. Марченко, В.И. Шуркина // Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности» (Ч.1) / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020. 318 с. С. 179-182

#### References

1. Frost V.N., Syzranova N.M. New in the use of secondary fibrous materials//Cellulose. Paper. Carton.-1992.- No. 2.-p. 13-14.
2. Waste paper effective raw materials for the pulp and paper industry//Pulp. Paper. Cardboard.: Express. M.: VNIPIEI Lesprom, 1992. №6. p. 2-10.
3. Bubble S.S. Resource-saving waste paper processing technology//Journal of LPK professionals. LesPromInform. 2006. №3 (34).
4. Slizikova E.A. The future of the pulp and paper industry: recycling//Scientific community of students of the XXI century. Technical Sciences: Sat. Art. by mat. CVI International Studio Scientific Practice conf. № 10(105). Novosibirsk, 2021. 161 p.
5. Muravitskaya A.A. The influence of the type of treatment on the grinding of various fibrous material/A.A. Muravitskaya, R.A. Marchenko, V.I. Shurkina//All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists "Modern Trends in the Development of Chemical Technology, Industrial Ecology and Technosphere Safety" (Ch.1) /VSHTTE SPbGUPTD St. Petersburg, 2020. 318 p. p. 179-182

© Попова М. М., Слизикова Е. А., Токоякова Н. Н.,  
Марченко Р. А., Шуркина В. И., 2022

УДК 676.15

## СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Е. А. Рогова\*, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, И. Р. Лапин

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

*В настоящее время бактериальная целлюлоза приобрела широкий спектр применения. Самое распространенное применение БЦ найдено в медицине: от простых восстанавливающих повязок, до сложных напечатанных 3D изделий. На втором месте является бумажная промышленность, с получением из БЦ бумаги различного качества и назначения. Помимо этого БЦ применяется для получения текстиля, биобетонов, суперсорбентов, косметических средств, продуктов, а так же мембран. В связи с разнообразием применения, получение БЦ является одним из важных вопросов.*

*Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, биореактор, инокулят, условия культивирования, применение бактериальной целлюлозы.*

## METHODS FOR OBTAINING BACTERIAL CELLULOSE

E. A. Rogova\*, Y. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov, I. R. Lapin

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

*Currently, bacterial cellulose has acquired a wide range of applications. The most common application of BC has been found in medicine: from simple restorative dressings to complex 3D printed products. In second place is the paper industry, with the production of paper of various quality and purpose from the business center. In addition, BC is used to produce textiles, biobetons, supersorbents, cosmetics, products, as well as membranes. Due to the variety of applications, obtaining a BC is one of the important issues.*

*Keywords: bacterial cellulose, bioreactor, inoculate, cultivation conditions, application of bacterial cellulose.*

Бактериальная целлюлоза (БЦ) имеет ряд преимуществ по сравнению со своим растительным аналогом. Микробиологическую целлюлозу синтезируют представители родов *Agrobacterium*, *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Enterobacter*, *Sarcina*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Alcaligenes* и *Mycodema*. Но классическим производителем этого материала считается бактерия *Gluconoacetobacter xylinum*. Эта грамотрицательная, палочковидная, строго аэробная бактерия.

БЦ отличается повышенной эластичностью и отсутствием примесей гемицеллюлоз и лигнина, которые всегда сохраняются даже после самой тщательной очистки материала растительного происхождения. БЦ образует достаточно прочную гелевую пленку с определенной архитектурой из кристаллических микрофибрилл. Такая архитектура позволяет удерживать недоступное для растительной целлюлозы количество воды.

Свойства БЦ зависят от множества факторов – условий культивирования, типа микроорганизмов и питательных веществ, присутствующих в питательной среде. В настоящее время получение оптимальных условий культивирования БЦ получило широкое распространение среди исследователей. Помимо получения оптимальных условий культивирования, особое значение уделяется выявлению лучшей модификации среды Хестрина и Шрамма (ХШ). В лабораторных исследованиях применялся общий процесс получения Бактериальной целлюлозы (БЦ) от культивирования организмов до конечного продукта применения. Весь процесс получения представлен на рисунке 1.

Общая технология культивирования БЦ, включает в себя следующие этапы:

- отбор и выращивание чистой бактериальной культуры в лабораторных условиях;
- составление композиции инокулята;

- производство БЦ одним из известных способов;
- очистка от загрязнений.

После очистки БЦ может применяться как в чистом виде, так и подвергаться функционализации, в зависимости от сферы ее применения.

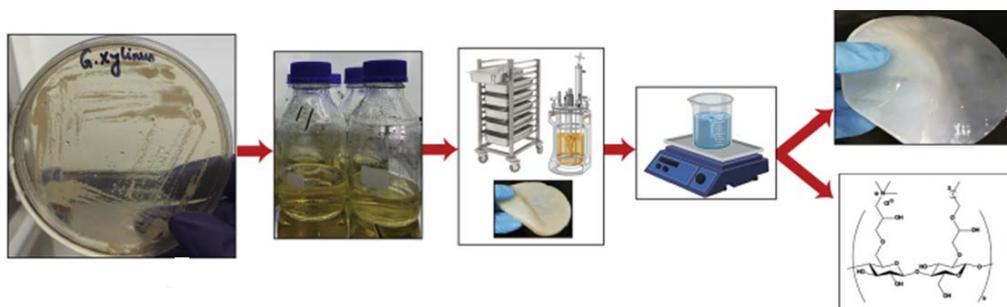


Рис. 1. Схема общего процесса получения БЦ [1]

Основным оборудованием при культивировании БЦ являются лабораторные биореакторы, которые представляют собой стеклянные ванны различной формы и размеров. Такое оборудование применяется для культивирования и получения БЦ в виде пленок. Пример таких биореакторов представлен на рисунке 1. Для ускорения процесса культивирования и получения большего выхода БЦ, авторами статьи [2], был предложен способ усовершенствования данного типа биореактора, путем добавления воздушных потоков между крышкой биореактора и инокулятом. Благодаря такой модификации, казалось бы обычного лабораторного оборудования, авторы смогли увеличить производительность данного оборудования на 65 % [2].

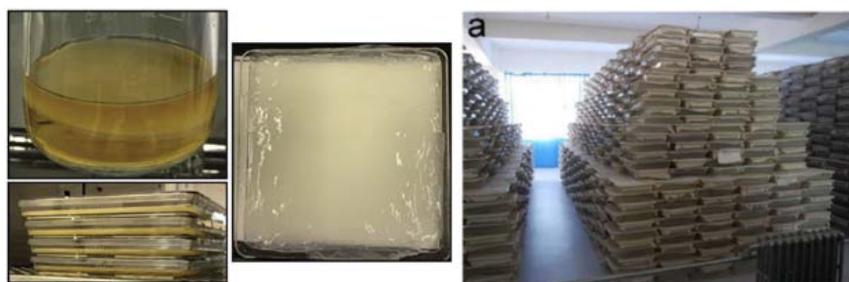


Рис. 2. Лабораторные биореакторы [1]

Однако этот метод культивирования требует больших площадей поверхности и длительных периодов культивирования, что может препятствовать массовому производству. За последнее время было разработано несколько других биореакторов, которые могут производить БЦ в лабораторных условиях (рис. 3) с более высокими выходами, но они так же имеют недостатки в своих конструкциях и применимы только для получения БЦ одного определенного качества.



Рис. 3. Биореакторы [3,4,5]

- а) биореакторы для культивирования БЦ с мешалкой; б) вращающийся дисковый биореактор; в) аэрозольный биореактор

Для получения БЦ различного качества при различных условиях культивирования нами был разработан горизонтальный биореактор барабанного типа. С помощью этого оборудования появляется возможность получение БЦ различного качества и большего объема при задействовании меньшей производственной площади.

#### Библиографические ссылки

1. D.A. Gregory, L. Tripathi , A.T.R. Fricker , E. Asare, I. Orlando, V. Raghavendran , I. Roy. Bacterial cellulose: A smart biomaterial with diverse applications// 2021. № 145. Pp.
2. I. Cielecka , M. Rynhajło, S. Bielecki. BNC Biosynthesis with Increased Productivity in a Newly Designed Surface Air-Flow Bioreactor // Applied Sciences, 2020. 10(11):3850. DOI:10.3390/app10113850
3. Isabela de Andrade Arruda Fernandes , Alessandra Cristina Pedro , Valéria Rampazzo Ribeiro , Débora Gonçalves Bortolini , Mellany Sarah Cabral Ozaki , Giselle Maria Maciel , Charles Windson Isidoro Haminiuk. Bacterial cellulose: From production optimization to new applications // Biological Macromolecules, 2020. № 164. Pp. 2598–2611.
4. C. Zhong. Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020. № 8. DOI:10.3389/fbioe.2020.605374
5. N. Zhuravleva, A. Reznik, D. Kiesewetter, A. Stolpner, A. Khripunov, J. Phys. Possible applications of bacterial cellulose in the manufacture of electrical insulating paper // Journal of Physics: Conference Series, 2018. Vol. 1124, № 3. DOI:10.1088/1742-6596/1124/3/031008

#### References

1. D.A. Gregory, L. Tripathi , A.T.R. Fricker , E. Asare, I. Orlando, V. Raghavendran , I. Roy. Bacterial cellulose: A smart biomaterial with diverse applications// 2021. № 145. Pp.
2. I. Cielecka , M. Rynhajło, S. Bielecki. BNC Biosynthesis with Increased Productivity in a Newly Designed Surface Air-Flow Bioreactor // Applied Sciences, 2020. 10(11):3850. DOI:10.3390/app10113850
3. Isabela de Andrade Arruda Fernandes , Alessandra Cristina Pedro , Valéria Rampazzo Ribeiro , Débora Gonçalves Bortolini , Mellany Sarah Cabral Ozaki , Giselle Maria Maciel , Charles Windson Isidoro Haminiuk. Bacterial cellulose: From production optimization to new applications // Biological Macromolecules, 2020. № 164. Pp. 2598–2611.
4. C. Zhong. Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020. № 8. DOI:10.3389/fbioe.2020.605374
5. N. Zhuravleva, A. Reznik, D. Kiesewetter, A. Stolpner, A. Khripunov, J. Phys. Possible applications of bacterial cellulose in the manufacture of electrical insulating paper // Journal of Physics: Conference Series, 2018. Vol. 1124, № 3. DOI:10.1088/1742-6596/1124/3/031008

© Рогова Е.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А., Лапин И.Р., 2022

УДК 616-003.725

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ЦЕННЫХ СИБИРСКИХ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ

М. Н. Романова, Ю. С. Шимова, Е. В. Лис

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

*Тенденцией последних лет является поиск альтернативных ресурсов, которые смогут снизить нагрузку на леса нашей планеты. Paulownia Tomentosa (Павловния войлочная), отличается повышенным содержанием ценных соединений, высокой скоростью роста и устойчивостью к действию неблагоприятных факторов окружающей среды и может быть предложена в качестве альтернативного сырья в различных отраслях промышленности.*

*Ключевые слова: экология, лесные ресурсы, Paulownia Tomentosa, биологически активные вещества, природопользование, химический состав*

## USING ALTERNATIVE FOREST RESOURCES TO PRESERVE VALUABLE SIBERIAN TREE SPECIES

M. N. Romanova, Y. S. Shimova, E. V. Lis

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

*The trend of recent years is the search for alternative resources that can reduce the pressure on the forests of our planet. Paulownia Tomentosa, is characterized by a high content of valuable compounds, high growth rate and resistance to adverse environmental factors and can be offered as an alternative raw material in various industries.*

*Keywords: ecology, forest resources, Paulownia Tomentosa, biologically active substances, environmental management, chemical composition*

Современное общество сталкивается с различными экологическими проблемами, которые с каждым годом все больше волнуют каждого человека. Одной из самых значимых тем в охране окружающей среды является нерациональное использование природных ресурсов. Тенденцией последних лет является поиск альтернативных ресурсов, которые смогут снизить нагрузку на леса нашей планеты.

Традиционное сибирское растительное сырье, используемое в промышленности для получения биологически активных веществ, целлюлозы, продуктов механической переработки древесины, характеризуется низкой скоростью роста, поэтому для снижения экологической нагрузки, актуальным является поиск альтернативных ресурсов, обладающих высокой скоростью роста, устойчивостью к воздействию неблагоприятных факторов, по компонентному составу и другим характеристикам не уступающим традиционному сырью.

Paulownia Tomentosa (Павловния войлочная), согласно литературным данным [1-3], соответствует предъявляемым требованиям и может рассматриваться как один из альтернативных лесных ресурсов для использования в промышленности. В странах Европы, Азии и Америке Павловния войлочная широко применяется во многих отраслях промышленности и для решения экологических проблем. Однако, ее распространение ограничивается действием низких отрицательных температур, поэтому в России она практически не используется. Экологическое и практическое значения изучения

*Paulownia Tomentosa* для культивирования на территории России обуславливают актуальность научно-исследовательской работы.

Для перспективного использования растительного сырья необходимо изучение его химического состава в условиях, в которых оно будет выращиваться для промышленного использования. В связи с тем, что основным фактором, ограничивающим распространение *Paulownia Tomentosa* в Сибири, является действие низких отрицательных температур, выращивание образцов осуществляли в закрытом грунте. С этой целью на кафедре химической технологии древесины и биотехнологии СибГУ им. М. Ф. Решетнева были выращены образцы в условиях, соответствующих будущему плантационному выращиванию. Методами, принятыми в химии растительного сырья, был определен компонентный состав вегетативной части *Paulownia Tomentosa* [4-5]. Все данные приведены в пересчете на абсолютно сухую массу вещества.

Содержание минеральных компонентов в вегетативной части *Paulownia Tomentosa* составило около 10 %. Содержание углеводной части в вегетативной части Павловнии войлочной составило 24,4 %, из них легкогидролизуемые полисахариды – 8,20 %, трудногидролизуемые – 16,20 %. На долю веществ, извлекаемых гексаном из листьев Павловнии войлочной приходится около 12 %, этиловым спиртом – около 15 %, водно-этанольной смесью – около 14 %, водой – около 7 %. Содержание общего белка в вегетативной части *Paulownia Tomentosa* составило 20,65 %, содержание водорастворимого белка – 2,83 %.

Содержание пигментов составило: хлорофилл а около 0,07 %, хлорофилл б – около 0,31 %, каротиноиды – около 0,15 %. Содержание полифенольных соединений в вегетативной части Павловнии войлочной является достаточно высоким и составляет около 20 %. Из них 4,1 % приходится на флавоноиды, 5,7 % – таннины, 7,4 % – сапонины, 0,91 % – антоцианы.

Исходя из изученного компонентного состава, можно рекомендовать рассматривать вегетативную часть Павловнии войлочной для использования в качестве альтернативного сырья в пищевой, косметической, фармацевтической промышленности в качестве источника белка, витаминов, полифенольных соединений.

При возможности интродукции *Paulownia Tomentosa* на территории Сибири одним из перспективных направлений использования можно рассматривать применение ее в качестве кормовой добавки. С учетом высокого содержания азотсодержащих соединений, минеральных компонентов, витаминов, использование вегетативной части в качестве корма будет высокоэффективным для сельского хозяйства. Была рассмотрена возможность использования как исходной вегетативной части *Paulownia Tomentosa*, так и остатков после экстракции в качестве кормовой добавки в животноводстве, для этого была определена перевариваемость исходного сырья, а также остатков после водной и спиртовой экстракции. Перевариваемость исходного сырья составила 54 %, перевариваемость после спиртовой и водной экстракции 56 и 60 % соответственно.

Высокая скорость роста, устойчивость к действию неблагоприятных внешних факторов, изученный компонентный состав позволяют рассматривать *Paulownia Tomentosa* в качестве альтернативного источника сырья в различных отраслях промышленности Сибири. Возможность интродукции растения на территории Сибири может существенно расширить область его применения и позволить снизить использование традиционных видов сырья в целлюлозно-бумажной, кормовой промышленности, а также использовать растение для озеленения загрязненных урбанизированных территорий.

### Библиографические ссылки

1. Alcoholic extracts from *Paulownia tomentosa* leaves for silver nanoparticles synthesis / Yosari S. Pontaza-Licona, A. L. Ramos-Jacques, J. A. Cervantes-Chavez, J. LuisLópez-Miranda and etc // *Results in Physics*. 2019. Vol. 12, № 4. P. 1670-1679. direct text.
2. The potential chemo preventive effect of ursolic acid isolated from *Paulownia tomentosa*, against N-diethylnitrosamine: initiated and promoted hepatocarcinogenesis / Sanaa A. Ali, Nabaweya A. Ibrahim, Magdy M. D. Mohammed, Seham El-Hawary, Esraa A. Refaat // *Helyon*. 2019. Vol. 5, № 5. direct text.
3. C-geranylated flavonoids from *Paulownia tomentosa* Steud / Lenka Molčanová, Jakub Treml, Veronika Leláková // *Journal of Ethnopharmacology*. 2022. direct text.
4. Ушанова, В. М. Основы научных исследований. Исследование химического состава растительного сырья / В. М. Ушанова, О. И. Лебедева, А. Н. Девятловская. Красноярск: СибГТУ, 2004. 360 с. Библиогр: с. 355-359. Текст : непосредственный.

5. Зеленцова, Е. Н. Химия биологически активных веществ / Е. Н. Зеленцова. Саратов : ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2015. 85 с. Библиогр: с. 82. Текст : непосредственный.

### References

1. Alcoholic extracts from Paulownia tomentosa leaves for silver nanoparticles synthesis / Yosari S. Pontaza-Licona, A. L. Ramos-Jacques, J. A. Cervantes-Chavez, J. LuisLópez-Miranda and etc // Results in Physics. 2019. Vol. 12, № 4. P. 1670-1679. direct text.

2. The potential chemo preventive effect of ursolic acid isolated from Paulownia tomentosa, against N-diethylnitrosamine: initiated and promoted hepatocarcinogenesis / Sanaa A. Ali, Nabaweya A. Ibrahim, Magdy M. D. Mohammed, Seham El-Hawary, Esraa A. Refaat // Helyon. 2019. Vol. 5, № 5. direct text.

3. C-geranylated flavonoids from Paulownia tomentosa Steud / Lenka Molčanová, Jakub Treml, Veronika Leláková // Journal of Ethnopharmacology. 2022. direct text.

4. Ushanova, V. M. Fundamentals of scientific research. Study of the chemical composition of plant raw materials / V. M. Ushanova, O. I. Lebedeva, A. N. Devyatlovskaya. Krasnoyarsk: SibGTU, 2004. 360 p. Bibliographer: p. 355-359. direct text.

5. Zelentsova, E. N. Chemistry of biologically active substances / E. N. Zelentsova. Saratov: FGBOU VO Saratov State Agrarian University, 2015. 85 p. Bibliographer: p. 82. direct text.

© Романова М. Н., Шимова Ю. С., Лис Е. В., 2022

УДК 676.024.6

## ЭКОВАТА КАК ЭКОЛОГИЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Е. А. Слизикова, В. И. Шуркина, Р. А. Марченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: 905426521lena@mail.ru

*В статье рассмотрены преимущества и недостатки применения эковаты. Также ее состав и область применения.*

*Ключевые слова: вторичное сырье, эковата, газетная макулатура, экологичность.*

## ECO-WOOL AS AN ECO-FRIENDLY MATERIAL FROM RECYCLED MATERIALS

E. A. Slizikova, V. I. Shurkina, R. A. Marchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 905426521lena@mail.ru

*The article discusses the advantages and disadvantages of using eco-cotton. Also its composition and scope.*

*Keywords: secondary raw materials, eco-wool, newspaper waste paper, environmental friendliness.*

Одной из основных современных экологических проблем является проблема переработки макулатурного сырья. Можно подумать, что России не нужно заниматься переработкой вторсырья, ведь земельные участки с лесными массивами занимают значительную территорию. Но использование идет такими быстрыми темпами, что вопрос утилизации и переработки стал очень остро. Это может решить проблемы нехватки сырья и ресурсов, сохранности лесных площадей, позволит предотвратить экологическую катастрофу и снизить себестоимость готовой продукции [1].

Практика показала, что самый эффективный путь переработки картонно-бумажных отходов это использование их в производстве: санитарно-гигиенических изделий; картона; гофрокартона. Однако еще одним из наиболее популярных направлений переработки макулатуры является получение эковаты.

Эковата (рис. 1) – это продукт переработки бумажного вторсырья. На её изготовление преимущественно идет газетная макулатура. Она и составляет основу будущего утеплителя. Её измельчают и смешивают с веществами, придающими материалу стойкость к воздействию огня и различных микроорганизмов.

Материал на 80 % состоит из волокон вторичного сырья, которые и обеспечивают основную функцию теплоизоляции и внешнего шумопоглощения. Кроме того, волокна имеют подходящие механические свойства для создания бесшовного однородного покрытия. 20 % эковаты составляют вспомогательные вещества – бура и борная кислота, которые необходимы для нивелирования таких свойств целлюлозы, как горючесть и биологическая неустойчивость [2].

Благодаря антипереновым свойствам буры эковата относится к классу пожаробезопасности Г2, а антисептические свойства борной кислоты обеспечивают долговечную защиту от гнили, грибов и грызунов [3].

Эковата является альтернативой широко распространенным изоляционным материалам: минеральным, базальтовым ватам, стекловатам, керамзиту, экструдированному пенополистиролу.

Основные ее преимущества заключаются в следующем:

– высокие тепло-, влаго- и звукоизолирующие качества;

- безотходность производства;
- многократное использования;
- экологичность, биостойкость.

Однако у эковаты есть и недостатки [4]:

- усадка теплоизоляционного слоя. Со временем рыхлый волокнистый материал усаживается, уплотняется, теряет объем, и его теплоизоляционные свойства снижаются.
- проблемы монтажа. При желании изолировать монолитные стены или заполнить полости каркасного дома, потребуется специальное оборудование и опытные операторы, которые пока есть не везде. А при утеплении перекрытий ручным способом спрессованный материал, освобожденный от упаковки, необходимо разрыхлить с помощью дрели с насадкой. При этом образуется много всепроникающего мусора и аллергенной пыли.
- невозможность устройства бескаркасной изоляции. Эковата отличается низкой жесткостью и применяется только как насыпной или напыляемый утеплитель. Её невозможно закрепить на вертикальных конструкциях без специального каркаса и защитной облицовки.



Рис. 1. Эковата из газетной макулатуры

Главная сфера применения – гражданское, промышленное и коммерческое строительство. Возможно использовать ее в качестве тепло и звукоизоляционного материала крыши, пола, перекрытий, внешних стен и внутренних перегородок, как в индивидуальных, так и в многоквартирных домах.

Среди других областей применения наиболее перспективным является использование эковаты как фильтрующего и сорбирующего материала для нефти и масла. Кроме того, эковата может применяться в качестве наполнителя для теплоизолирующих поверхностей с невысокой температуростойкостью; выгорающей добавки высокотемпературных теплоизоляционных изделий; добавки в битумно-асфальтовые смеси.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что получение эковаты и технологии для её производства являются перспективной темой для дальнейших исследований.

#### Библиографические ссылки

1. Назарова В. С. Анализ возможности переработки бумажных отходов в эковату / В. С. Назарова // Наука и молодежь в XXI веке : материалы III Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Омск, 30 ноября 2017 года. Омск: Омскбланкиздат, 2017. С. 134-137.
2. Крамаренко А. В. Показатели функциональной эффективности тепловой изоляции ограждающих конструкций с применением различных видов теплоизоляционных материалов / А. В. Крамаренко, С. Д. Кириченко, О. С. Кириченко // Инновации и инвестиции. 2018. № 5. С. 271-275.

3. Крамаренко А.В. Анализ преимуществ утеплителя нового поколения / А.В. Крамаренко, А.А. Иброхимов // Наука и образование: новое время. 2018. № 1 С. 32-37.
4. Максимов С.В. Эковата: плюсы и минусы, что это за утеплитель и как с ним работать. Москва, 2018. URL: <https://m-strana.ru/articles/ekovata-plyusy-i-minusy/>. (Дата обращения: 25.08.22)

#### References

1. Nazarova V. S. Analysis of the possibility of recycling paper waste in eco-cotton / V. S. Nazarova // Science and youth in the XXI century : materials of the III All-Russian Student Scientific and Technical Conference, Omsk, November 30, 2017. Omsk: Omskblankizdat, 2017. pp. 134-137.
2. Kramarenko A.V. Indicators of the functional efficiency of thermal insulation of enclosing structures using various types of thermal insulation materials / A.V. Kramarenko, S. D. Kirichenyuo, O. S. Kirichenko // Innovation and investment. 2018. No. 5. pp. 271-275.
3. Kramarenko A.V. Analysis of the advantages of a new generation insulation / A.V. Kramarenko, A.A. Ibrokhimov // Science and education: new time. 2018. No. 1 pp. 32-37.
4. Maximov S.V. Ekovata: pros and cons, what kind of insulation is this and how to work with it. Moscow, 2018. URL: <https://m-strana.ru/articles/ekovata-plyusy-i-minusy/>. (Accessed: 25.08.22)

© Слизикова Е. А., Шуркина В. И., Марченко Р. А., 2022

УДК 635.07;663:663.03

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАПИТКОВ

В. В. Тарнопольская<sup>1</sup>, Ж. А. Кох<sup>2</sup>, О. Н. Еременко<sup>1</sup>, Г. З. Ягудина<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>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 31  
E-mail veronichkat@mail.ru

*В работе представлены исследования перспектив использования ботвы моркови в качестве сырья для производства функциональных напитков.*

*Ключевые слова: морковь, функциональные напитки, повышенная биологическая ценность, ферментация.*

## EVALUATION OF PROSPECTS FOR THE USE OF NONTRADITIONAL PLANT RAW MATERIALS FOR FUNCTIONAL DRINKS PRODUCTION

V.V. Tarnopolskaya<sup>1</sup>, Zh.A. Koh<sup>2</sup>, O.N. Eremenko<sup>1</sup>, G.Z. Yagudina<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>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation  
E-mail veronichkat@mail.ru

*The work studies the prospects for the use of carrot's vegetative mass as raw material for production of functional drinks.*

*Keywords: carrot, functional drinks, increased biological value, fermentation.*

Растительное сырье служит ценным источником биологически активных веществ, которые способны оказывать общеукрепляющее, тонизирующее, иммуностимулирующее и защитное действие на различные системы организма человека. Обогащение продуктов функционального значения биологически ценными компонентами растительного происхождения возможно реализовать на базе существующих процессов пищевой биотехнологии. Одновременно с этим, необходимо принимать во внимание региональную сырьевую базу, что позволит разрабатывать рецептуры с учетом доступности местного сырья, спектр функциональных ингредиентов в составе которого весьма обширен.

Одним из перспективных видов сырья для использования в условиях Сибири является морковь, содержащая в своем составе значительное количество витаминов, минералов и иных биологически активных компонентов. При этом корнеплоды моркови достаточно широко используются в пищевой индустрии, в то время как ее ботва, не менее богатая ценными физиологически значимыми компонентами, не находит полезного применения. Исследования, проводимые на кафедре химической технологии древесины и биотехнологии СибГУ им. М. Ф. Решетнева, позволяют считать, что включение морковной ботвы, как один из компонентов, в производстве функциональных напитков, позволит получить продукт с повышенной биологической ценностью и оригинальными органолептическими характеристиками.

Как правило, при сборе моркови, ботву отрывают и выбрасывают, однако ботва моркови практически также полезна, как и сам корнеплод. По виду ботва напоминает петрушку, имеет такие же метельчатые листья. В составе морковной ботвы присутствуют витамины В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub>, С, К, РР, D, E, а также минеральные вещества такие как магний, железо, натрий, марганец, медь, фосфор, цинк и селен, кальций и калий. Чай из морковной ботвы может рассматриваться функциональный напиток

с повышенной биологической ценностью. При заваривании ботва теряет часть витамина С, однако самый ценный витамин К, а также группа В и А сохраняются без снижения содержания [1].

В работе определено содержание основных пищевых и биологически ценных компонентов в ботве моркови сорта «Лосиноостровская» (урожай сентябрь 2021 года, Манский район Красноярского края). Обращает внимание значительное, более 11 %, содержание легкодоступных углеводов, при этом в исследуемом сырье также присутствуют трудногидролизуемые полисахариды, или клетчатка.

Исследование витаминного профиля морковной ботвы демонстрирует значительное содержание витамина С (свыше 20 мг на 100 г сырья), витамина В<sub>1</sub> (до 0,1 мг на 100 г сырья) и витамина В<sub>2</sub> (свыше 0,02 мг на 100 г сырья). Содержащийся в ботве витамин В<sub>1</sub> нормализует работу нервной системы, повышает стрессоустойчивость, рекомендуется заваривать чай из морковной ботвы, при регулярном употреблении отмечается нормализация сна и снижение раздражительности [2]. Достаточно высокое содержание витамина С позволяет рассматривать морковную ботву в качестве значимого источника этого ценного антиоксидантного компонента в рационе.

Известно, что процесс ферментации, или ферментационного окисления растительного сырья, позволяет сохранить комплекс биологически активных веществ, повысить их биологическую доступность, а также повысить срок хранения и улучшить потребительские свойства и вкусовые показатели напитков. В этой связи следующий этап работы был посвящен исследованию влияния ферментационной обработки на состав ботвы моркови, исследовали содержание основных биологически ценных компонентов, в частности витаминов, в ферментированной морковной ботве. Полученные результаты свидетельствуют о сохранении доли основных компонентов в сырье после ферментации, при этом срок хранения ферментированной ботвы может быть значительно повышен по сравнению с исходной. Обращает внимание сохранение уровня витаминов в процессе ферментации. Данный класс биологически активных веществ относится к термолабильным, однако выбранный режим обработки исходного сырья не предполагает термического воздействия, является щадящим и способен сохранить биологическую ценность растительного материала.

Проведенные исследования демонстрируют положительное влияние ферментации на состав и сроки хранения морковной ботвы. Этот метод позволяет не только продлить срок хранения, во время ферментации вещества, содержащиеся в сырье, перестают быть «закрытыми» и переходят в разряд водорастворимых и легкоусвояемых для человека [3]. Необходимо отметить, что в зависимости от природы функционального ингредиента и типа продукта, биологическую ценность которого предлагается повысить, выбирают различные технологические решения поставленной задачи. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ботвы моркови в производстве функциональных напитков.

### Библиографические ссылки

1. Чимонина И.В. Биотехнологические особенности использования моркови и ее влияние на организм человека // Мир науки, культуры, образования. 2014. №3. С. 419-420.
2. Голубкина Н.А., Сирота С.М. Биологически активные соединения овощей: учебное пособие. Москва : ВНИИССОК, 2010. 199 с.
3. Гинс М.С., Пивоваров В.Ф. Научное обеспечение инновационных технологий при создании функциональных продуктов на основе овощных культур // Овощи России. 2014. №1. С. 4-9.

### References

1. Chimonin I.V. *Biotechnologicheskie osobennosti ispol'zovaniya morkovi i ee vliyanie na organism cheloveka* [Biotechnology specifics of carrot and its influence on human organism] // *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*. 2014, no. 3, p. 419-420 (In Russ).
2. Golubkina N.A., Sirota S.M. *Biologichesky aktivniye soedineniya ovoshey* [Biologically active compounds of vegetables]. Moscow, VNIISOK Publ., 2010, 199p (In Russ).
3. Gins M.S. *Nauchnoe obosnovanie innovatsionnikh tehnologiy pri sozdanii funktsional'nykh produktov na osnove ovoshnikh kultur* [Scientific grounds of innovative technologies for producing functional products from vegetables] // *Ovoshi Rossii*. 2014, no.1, p. 4-9 (In Russ).

УДК 674.81

## ДРЕВЕСНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОРЫ ДРЕВЕСИНЫ

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 данной работе рассматриваются результаты рационального использования отходов деревообработки в производстве композиционных материалов.*

*Ключевые слова: древесное сырье, корьевые плиты, термомодификация, композиционные материалы.*

## WOOD COMPOSITES BASED ON MODIFIED WOOD BARK

A. E. Tyumentseva, A. Yu. 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

*This paper discusses the results of the rational use of woodworking waste in the production of composite materials.*

*Keywords: wood raw materials, bark slabs, thermal modification composite materials.*

На сегодняшний день вопрос биосферы стоит достаточно остро. Весь мир стремится к экологичности, к рациональному использованию природных ресурсов, энергоресурсов, иных благ. Древесина, как материал, пользуется высоким спросом в различных отраслях, так как обладает высокими эксплуатационными свойствами.

Несмотря на огромное количество производств по переработки древесины, каждое из производств сталкивается с ежедневной проблемой переработки или утилизации отходов, не входящих в основной процесс производства определенной продукции. В общем случае, к отходам деревообрабатывающих предприятий можно отнести: стружку, опилки, древесную пыль, а также древесную кору. Многие из перечисленных отходов в настоящее время подлежат переработке, а полученная продукция на рынке вызывает спрос. В целом, добиться максимального использования отходов деревообрабатывающих предприятий можно используя новое оригинальное оборудование и нетрадиционные способы обработки. К примеру, использовать древесную кору можно не только в качестве топливного сырья при сжигании или в производстве лекарственных препаратов, но и применяя ее в качестве наполнителя в производстве композиционных материалов.

Кора имеет более сложное строение чем древесина и предназначена для выполнения особых функций: проводить питательные вещества, выработанные листьями, а также защищать дерево от неблагоприятных внешних воздействий. Кора представляет собой совокупность тканей стебля и корня, находящихся снаружи от камбия. В строении коры наиболее важную роль играет луб, или флоэма, осуществляющая проведение продуктов ассимиляции. Однако функции коры не ограничиваются только транспортом веществ, она участвует в накоплении веществ, используемых в процессе жизнедеятельности растения, выделении отбросов, защищает внутренние ткани растения от неблагоприятных факторов внешней среды [1].

Представляется возможным применять методы модификации такого сырья. В современную эпоху на первый план выходят забота о здоровье человека и экологии. Окружающие людей предметы должны соответствовать высоким стандартам экологичности и гигиеничности. Этим стандартам пол-

ностью соответствует технология термической модификации древесины, которая устраняет необходимость химической обработки изделий из дерева. После термической обработки у древесины наблюдается: уменьшение разбухания, повышение биостойкости и формостабильности, изменение показателей твердости и прочности древесины.[2].

В данной работе для повышения эксплуатационных свойств материала на основе коры предлагается использовать предварительную модификацию сырья. Термическая обработка древесины традиционно осуществляется при высокой температуре от 150 до 280°C различными агентами: паром, жидкостью, инертным газом. Наиболее распространен механизм обработки древесины или древесных материалов высокой температурой, достигающей от 180 до 240°C в среде водяного пара. Такой способ отличается высокой экологичностью и самого процесса обработки, и получаемого в результате материала. Помимо этого свойства термически обработанной древесины в определенной мере можно менять в зависимости от температуры и продолжительности обработки, давления и вида среды, а также от породы и изначальной влажности древесины[3].

Для осуществления процесса модификации кора предварительно измельчается с помощью измельчителя ножевого типа. Процесс обработки осуществляется в модифицированной камере в три этапа: нагревание-высокотемпературная сушка, термообработка, охлаждение-кондиционирование.

В дальнейшем из обработанной коры изготавливаются образцы композиционного материала, свойства которых существенно отличаются от свойств образцов композиционного материала из исходной коры.

Таким образом, кора является полноценным отходом деревообрабатывающей промышленности и требует повышенного внимания с точки зрения исследований по поиску решений изготовления из нее композиционных материалов с высокими физико-механическими свойствами, а также использование процесса модифицирования с точки зрения придания композиционным материалам на основе коры новых свойств является перспективным направлением исследований

#### Библиографические ссылки

1. Симонов, М. Н. Некоторые физические и механические свойства коры основных древесных пород / Симонов М. Н. Лесной журнал. 1962. № 5.
2. Патент № 2422266 Российская федерация, МПК В27К 5/00(2006.01). Способ термообработки древесины / Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю., Сафин Р.Г., Кайнов П.А. № 2009146406/21; заявл. 14.12.2009 : опубл. 27.06.2011– 3 с.
3. Патент № 2484110 Российская федерация, МПК С08L 97/02(2006.01). Древесно–полимерная композиция / Ушанова В.М., Криворотова А.И. № 2011129135/05: заявл. 13.07.2011 : опубл. 10.06.2013 4 с.

#### References

1. Simonov, M. N. Some physical and mechanical properties of the bark of the main tree species / Simonov M. N. Lesnoy zhurnal. 1962. No. 5.
2. Patent No. 2422266 Russian Federation, IPC B27K 5/00(2006.01). Method of heat treatment of wood / Safin R.R., Razumov E.Yu., Safin R.G., Kainov P.A. No. 2009146406/21; application 14.12.2009 : publ. 27.06.2011– 3 p
3. Patent No. 2484110 Russian Federation, IPC C08L 97/02(2006.01). Wood–polymer composition / Ushanova V.M., Krivorotova A.I. No. 2011129135/05: application 13.07.2011 : publ. 10.06.2013 4 p.

© Тюменцева А. Е., Лопатин А. Ю., Эскин В. Д., Криворотова А. И., 2022

УДК 676.157

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ ПРИ ЕЕ РАЗМОЛЕ НА СРЕДНЮЮ ДЛИНУ ВОЛОКНА\*

А. В. Ушаков\*, Ю. Д. Алашкевич, А. А. Карелина, Н. С. Решетова

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

\*E-mail: al.ushakov2194@mail.ru

*От сохранности исходной длины волокна зависят прочностные характеристики бумажного продукта. В работе представлены результаты процесса размола волокнистой массы высокой концентрации. Установлено, что средняя длина волокна с ростом концентрации волокнистой массы увеличивается.*

*Ключевые слова: размол, средняя длина волокна, степень помола, концентрация, прочностные характеристики.*

## EFFECT OF PULP CONSISTENCE DURING REFINING ON AVERAGE FIBER LENGTH

A. V. Ushakov\*, Y. D. Alashkevich, A. A. Karelina, N. S. Reshetova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: al.ushakov2194@mail.ru

*The strength characteristics of the paper product depend on the safety of the original fiber length. This paper presents the results of a high consistence pulp refining process. It has been found that the average fiber length increases with increasing fiber concentration.*

*Keywords: refining, average fiber length, degree of refining, consistence, strength characteristics.*

Для придания высоких количественных значений физико-механических характеристик у готовой бумажной продукции важно обеспечивать максимально возможную сохранность исходной длины волокна в процессе размола волокнистого полуфабриката. В исследованиях проведенных ранее установлено, что в случае размола массы высокой концентрации (от 5 % и выше), лучше сохраняется длина волокон, о чем свидетельствуют данные фракционного состава [1]. Такое явление, связано прежде всего с тем, что помимо воздействия размалывающих гарнитур, разработка волокон осуществляется за счет их интенсивного трения между собой. Силы трения, возникающие между волокнами, при размоле массы высокой концентрации приводят к их интенсивной поверхностной обработке с последующей фибрилляцией без значительного укорочения [2]. Сохранность исходной длины важна при размоле целлюлозы, состоящей из коротковолокнистых пород древесины, например, таких как лиственница [3].

На кафедре МАПТ СибГУ им. М.Ф. Решетнёва ранее были проведены исследования влияния концентрации волокнистой массы от 2-3 % при размоле сульфатной беленой целлюлозы из лиственных пород древесины на среднюю длину волокна. Установлено, что более высокая сохранность средней длины волокна при равных степенях помола наблюдается при концентрации волокнистой массы 3 % [4].

Для исследования процесса размола волокнистой массы концентрацией от 5 % и выше была спроектирована и разработана новая размалывающая установка, у которой имеется шнековый питатель для подачи волокнистой массы в зону размола (рис. 1).

---

\* 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).

На разработанной установке были проведены экспериментальные исследования, направленные на исследование влияния процесса размола массы высокой концентрации, в пределах от 10 до 20 % на среднюю длину волокна. Размолу подвергалась сульфатная беленая целлюлоза из лиственных пород древесины – полуфабрикат АО группы «Илим». Эксперимент проводился при использовании гарнитуры с окружной формой ножей [5]. Частота вращения ротора составляла 2000 об/мин, величина межножевого зазора 1,5 мм. Подача волокнистой массы зону размола осуществлялась шнековым питателем при частоте вращения шнека 86 об/мин. После определенного числа пропусков массы через зону, определялся прирост степени помола по шкале °ШР. Отбирались пробы со степенью помола массы от 15 до 55 °ШР с шагом 15 °ШР, после чего измерялась средняя длина волокна с помощью анализатора волокна Morfi neo. На рис. 2 представлены графики зависимости средней длины волокна от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы.

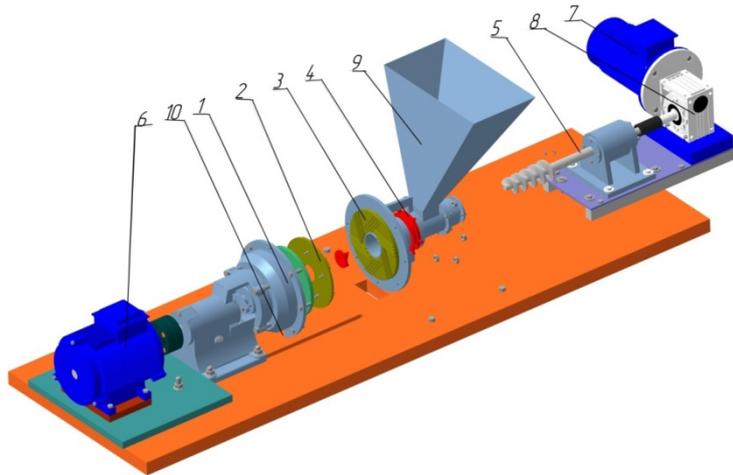


Рис. 1. Схема дисковой мельницы:

1 – зона размола; 2 – ротор, 3 – статор, 4 – присадочное устройство; 5 – шнековый питатель; 6 – электродвигатель ротора; 7 – электродвигатель привода шнекового питателя; 8 – червячный редуктор; 9 – бункер; 10 – выходное отверстие

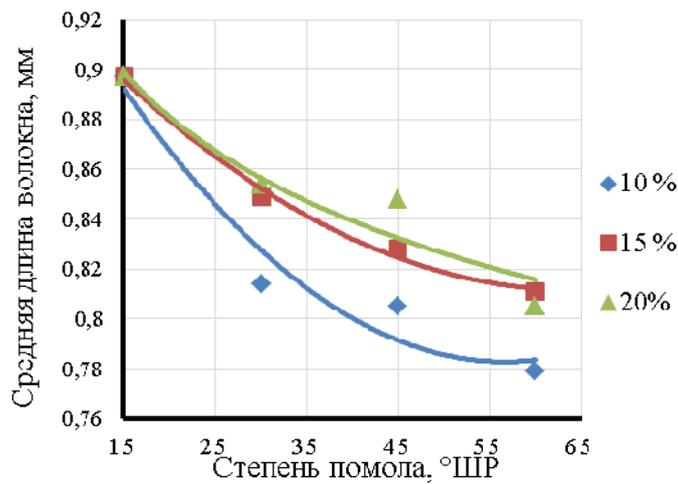


Рис. 2. Зависимость средней длины волокна от роста степени помола при различной концентрации волокнистой массы

Из рисунка видно, что с ростом степени помола массы средняя длина волокна снижается при всех концентрациях массы. Однако, с повышением концентрации размалываемой массы интенсивность снижения средней длины волокна уменьшается. Так при степени помола 60 °ШР у концентрации

размалываемой массы 20 % средняя длина волокна варьируется в пределах 0,81 мм. При той же степени помола у концентрации размалываемой массы 10 % средняя длина волокна составляет 0,78 мм. Таким образом, установлено, что размол массы высокой концентрации способствует сохранению исходной длины волокна, тем самым, обеспечивая повышение количественных характеристик прочностных свойств у бумажных отливок.

### Библиографические ссылки

1. Кларк, Дж. Технология бумаги. М.: «Лесная промышленность». 1983. 456 с.
2. Халандовский, И. Н. Размол сульфатной целлюлозы из лиственной древесины при высокой концентрации / И. Н. Халандовский, Л. Н. Лаптев, Н. Е. Трухтенкова. Текст : непосредственный // Бумажная промышленность. 1972. № 6. С. 5-7.
3. Матвеев, Б. П. Исследование основных факторов процесса размола сульфатной небеленой целлюлозы в дисковой мельнице при высокой концентрации : специальность 05.21.03 : дис. ... канд. техн. наук / Б. П. Матвеев. Ленинград, 1971. 233 с.
4. Изучение характеристик лиственной целлюлозы после ножевого размола / Д. Е. Зырянов, Н. С. Решетова, В. А. Севергин, Ю. Д. Алашкевич. // Лесной и химический комплекс проблемы и решения: сборник материалов по итогам Всероссийской науч.-прак. конф. (29 октября 2021, г. Красноярск.). 2022. С. 366 -369.
5. Патент № 2761545 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30. Размалывающая гарнитура : № 2021112036 : заявл. 26.04.2021: опубл. 09.12.2021 / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Кожухов В. А., Ушаков А. В. ; заявитель СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 10 с.

### References

1. Klark, D. Tekhnologiya bumagi [Paper technology]. M: «Forest industry» 1983. 456 p. (In. Russ.).
2. Khalandovsky, I. N. Razmol sul'fatnoy tsellyulozy iz listvennoy drevesiny pri vysokoy kontsentratsii [Refining hardwood sulphate pulp at high consistence] I. N. Khalandovsky, L. N. Laptev, N. E. Trukhtenkova. Text: direct // Paper industry. 1972. No. 6. P. 5-7. (In. Russ.)
3. Matveev, B. P. Issledovanie osnovnykh faktorov protsessa razmola sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy v diskovoy mel'nitse pri vysokoy kontsentratsii [Investigation of the main factors of the process of refining sulphate unbleached pulp in a disk mill at a high consistence] specialty 05.21.03 / B. P. Matveev. Leningrad, 1971. 233 p. (In. Russ.).
4. Izuchenie kharakteristik listvennoy tsellyulozy posle nozhevogo razmola [Study of the characteristics of hardwood pulp after knife refining] Lesnoy i khimicheskiy kompleks problemy i resheniya: sbornik materialov po itogam Vserossiyskoy nauch.-prak. konf. [Forest and chemical complex problems and solutions: a collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical. conf.]. (October 29, 2021, Krasnoyarsk). 2022. P. 366-369. (In. Russ.)
5. Patent No. 2761545 C1 Russian Federation, IPC D21D 1/30. Razmalyvayushchaya garnitura [Refining set] no. 2021112036 : app. 04/26/2021: publ. 09.12.2021 / Alashkevich Yu. D., Kovalev V. I., Kozhukhov V. A., Ushakov A. V.; applicant SibGU them. M.F. Reshetnev. 10 p.

© Ушаков А. В., Алашкевич Ю. Д., Карелина А. А., Решетова Н. С., 2022

УДК 674.8; 663

## БИОКОНВЕРСИЯ КАК СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ *PINUS SYLVESTRIS*\*

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 представлено возможность использования древесных отходов в качестве субстрата для микробиологической переработки.*

*Ключевые слова: сосна обыкновенная, кора, древесные отходы, экстракция, моноэтаноламин, гидромодуль, экстрактивные вещества, биоконверсия, биодеструкция, субстрат.*

## BIOCONVERSION AS A METHOD OF DISPOSAL OF WOOD WASTE OF THE 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 presents the possibility of using wood waste as a substrate for microbiological processing.*

*Keywords: scots pine, bark, wood waste, extraction, monoethanolamine, hydromodule, extractive substances, bioconversion, biodestruction, substrate.*

Красноярский край является лидирующим регионом по заготовке и переработки древесины в стране. На территории Красноярского края находятся большие объемы древесных ресурсов. Лесообразующими породами региона являются хвойные породы – сосна, лиственница и кедр [1]. В результате лесозаготовительных работ образуются древесные отходы, такие как древесная кора, опилки, зелень и др. В настоящее время такие отходы в полном объеме не используются и тем самым наносят вред окружающей среде, так как находятся в отвалах. Часть древесных отходов используется в качестве топлива и сжигается на деревоперерабатывающих предприятиях, что является экономически не выгодно из-за низкой теплотворной способности и высокого содержания золы и влаги. В тоже время древесные отходы являются ценным сырьем для многих производств [2]. Утилизация древесной коры является слабым звеном в комплексной переработке древесины. Известно, что кору используют в лигноцеллюлозных композитах в качестве наполнителя, что позволяет увеличить прочностные показатели, а также повышает теплоемкость и теплопроводность [3]. Кроме того, древесную кору применяют в качестве мульчи, что позволяет уменьшить потерю влаги и улучшить аэрацию почвы, а также сократить количество сорняков.

Отличительной особенностью коры от древесины является высокое содержание экстрактивных веществ, и тем самым является источником многих ценных веществ, из которых получают биологически активные, дубильные, красящие и прочие продукты. В качестве экстрагента для извлечения дубящих веществ наиболее перспективно применение щелочных реагентов, в частности моноэтаноламин, позволяющий извлечь из коры более 50 % веществ фенольного характера [4]. 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).

в качестве отхода остается до 50 % биомассы коры, так называемая одубина, которая требует утилизации.

Альтернативным вариантом переработки древесных отходов является биотехнологический способ [5].

Целью настоящего исследования была оценка конвертируемости древесных отходов сосны обыкновенной *Pinus Sylvestris* грибом *Pleurotus pulmonarius* штамм PP-3.2 в условиях твердофазной ферментации.

Объектом исследования являлись древесные отходы сосны обыкновенной *Pinus Sylvestris* опилки и кора, которая предварительно проэкстрагированная водным моноэтаноламином с концентрацией 1 %. Продолжительность процесса экстракции – 5 часов, жидкостный модуль – 10. В качестве биологического объекта использовали *Pleurotus pulmonarius* штамм PP-3.2, выделенный из коммерческих плодовых тел. Данный штамм находится в коллекции чистых культур кафедры «Химической технологии древесины и биотехнологии» СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

Субстрат представляет собой одубину и древесные опилки сосны в соотношении 1:1, которые предварительно увлажняли до 65-70 %, а также вводили соли  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  в количестве 1,0 и 0,5 г/л соответственно и подвергали глубокой стерилизации при 1 атм. Инокулят вносили в виде блоков, вырезанные микробиологическим пробойником из семисуточной культуры. Твердофазное культивирование осуществляли при температуре 25 °С до полного зарастания субстрата. Исследование химического состава исходного и конвертируемого субстрата проводили по методикам, принятым в химии растительного сырья [6].

О конвертируемости субстрата можно судить по результатам представленным в таб. 1.

Таблица 1

Вид и компонентный состав субстратов до и после биоконверсии

	Компонент	Опилки	Одубина	После биоконверсии
	Экстрактивные вещества	4,37	10,81	9,31
	Легкогидролизуемые полисахариды	13,40	11,77	15,64
	Трудногидролизуемые полисахариды	47,94	20,23	36,04
	Лигнин	28,95	38,39	27,93

Как видно из рисунка, представленного в таблице 1 полная колонизация субстрата происходит на 21-е сутки с образованием плодовых тел. При этом наблюдаются изменения в химическом составе субстрата. Содержание экстрактивных веществ в продукте биоконверсии увеличивается до 9,31 %, а в исходном субстрате составляет 7,5 %. В результате биодеструкции происходят изменения в лигно-углеводном комплексе: уменьшается содержание лигнина с 33,67 % до 27,93 %, и увеличивается содержание полисахаридов ЛГП и ТГП на 3 и 2 % соответственно. Кроме того, в результате биоконверсии в продукте установлено содержание белка около 5 %, а перевариваемость составляет более 45 %, что позволяет рекомендовать его в качестве кормовой углеводно-белковой добавки.

#### Библиографические ссылки

1. Хартанович Е.А., Зеленская Т.В. Состояние и использование лесосырьевой базы Красноярского края как предпосылки формирования кластера по переработке отходов лесного комплекса // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2020. № 11-3. С. 548-553.
2. Федоров В. С; Рязанова Т. В. Кора сибирских хвойных пород: состав, использование и обработка для извлечения танина. Forests 2021, 12, 1043.
3. Макарычев С. В. Теплофизические свойства термопластов, изготовленных на основе древесины из отходов лесной промышленности // Вестник Алтайского Государственного университета. 2015. № 6 (128). С. 139-142.
4. Пермякова, Г. В. Экстракция коры хвойных водно- органическими экстр агентами / Г. В. Пермякова, С. Р. Лоскутов, А. В. Семенович // Химия растительного сырья. 2008. № 2. С. 43-46

5. Гидродинамически активированные опилки сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. субстрат для культивирования штамма G14-16A *Ganoderma lucidum* / В. С. Федоров, Т. В. Рязанова, Ю. А. Литовка [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2022. Т. 15. № 1. С. 90-101. DOI 10.17516/1998-2836-0274.

6. Рязанова Т. В., Чупрова Н. А., Исаева Е. В. Химия древесины: учебное пособие в 2-х частях. Красноярск: СибГТУ, 2011, 389 с.

### References

1. Khartanovich E.A., Zelenskaya T.V. The state and use of the forest resource base of the Krasnoyarsk Territory as prerequisites for the formation of a cluster for the processing of forest complex waste. Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. 2020. No. 11-3. pp. 548-553.

2. Fedorov V. S.; Ryazanova T. V. Bark of Siberian conifers: composition, use and processing for tannin extraction. Forests 2021, 12, 1043.

3. Makarychev S. V. Teplofizicheskiye svoystva termoplastov, izgotovlennykh na osnove drevesiny izotkhodov lesnoy promyshlennosti. [Thermophysical properties of thermoplastics made on the basis of wood from forest industry waste]. Bulletin of the Altai State University. 2015, 6 (128), pp. 139-142

4. Permyakova G. V., Loskutov S. R., Semenovich A.V. [Extraction of coniferous bark with the addition of monoethanolamine ]. Chemistry of vegetable raw materials. 2008, no. 1, pp. 37-40.

5. Fedorov, V. S., Ryazanova, T. V., Litovka, Yu. A., Pavlov, I. N., Litvinova, E. A., Petrunina, E. A., Loskutov, S. R., Ermolin, V. N., Bayandin, M. A. Hydrodynamically activated sawdust of Common pine *Pinus sylvestris* L. substrate for cultivation of the strain G14–16A *Ganoderma lucidum*. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2022, 15(1), 90–101. DOI: 10.17516/1998-2836-0274

6. Ryazanova T. V., Chuprova N. A., Isaeva E. V. Chemistry of wood: a textbook in 2 parts. Krasnoyarsk: SibSTU, 2011, 389 p. (In Russ.)

© Федоров В. С., Рязанова Т. В., Мамаева О. О., 2022

УДК 676.022

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ СУХИМ СПОСОБОМ\*

Д. А. Худов, А. А. Шотов, Н. Г. Чистова, В. Н. Матыгулина

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

*В статье рассмотрены факторы, влияющие на процесс получения огнезащитных пресс-масс при производстве древесноволокнистых плит сухим способом. Определенно влияние массовой доли вермикулита в огнезащитной композиции на параметры пожарной опасности готовых плит.*

*Ключевые слова: древесноволокнистые плиты, вермикулит, огнезащитная пресс-масса, массовая доля.*

## THE USE OF MINERAL ADDITIVES IN THE PRODUCTION OF FIBERBOARD DRY METHOD

D. A. Khudov, A. A. Shotov, N. G. Chistova, V. N. Matyguлина

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

*The article considers the factors influencing the process of obtaining flame-retardant press masses in the production of fiberboard by dry method. The influence of the mass fraction of vermiculite in the flame retardant composition on the fire hazard parameters of the finished plates is definitely determined.*

*Keywords: fiberboard, vermiculite, flame retardant press mass, mass fraction.*

Древесноволокнистые плиты (ДВП) широко применяются практически во всех отраслях народного хозяйства. Увеличение объема производства ДВП и применения их в различных областях способствует расширению выпускаемой номенклатуры плит и изделий из них. На отечественном и зарубежном рынках востребованы ДВП со специальными свойствами: повышенной водостойкостью, био- и огнестойкостью, с высокими прочностными характеристиками, экологически безопасные [1, 2].

В настоящее время проводятся многочисленные исследования в области процесса прессования в производстве ДВП и интенсификации технологического процесса их производства. В то же время процессу размола древесных волокон для данного производства не уделяется должного внимания, научных работ по этой теме практически нет, а знания опираются на научные разработки по ножевому размолу в целлюлозно-бумажной промышленности и практические навыки производителей [3, 4].

Исследования процесса подготовки древесноволокнистых полуфабрикатов осуществлялись на промышленной установке завода ДВП сухого способа производства АО «Новоенисейский ЛХК», а также на экспериментальных установках лаборатории кафедры машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ имени академика М.Ф. Решетнева. Предварительный эксперимент производился для выявления факторов, влияющих на процесс получения огнезащитных пресс-масс и получение ДВП сухим способом с пониженной пожарной опасностью. В ходе исследований определялось влия-

---

\* 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).

ние массовой доли вермикулита в огнезащитной композиции на параметры пожарной опасности готовых плит.

Получение древесноволокнистого полуфабриката осуществляли в быстроходной ножевой дисковой мельнице – рафинер PR-42. Для подготовки вермикулитовых компонентов использовалась лабораторная установка для размола МР – 5 (Рис.1).



Рис. 1. Общий вид лабораторной установки для размола вермикулита МР – 5

Размалывающая мельница МР-5, работающая по сухому способу размола, подходит для подготовки и сепарирования вспученного вермикулита благодаря ее технологическим и конструктивным особенностям. Размалывающие частицы не нагреваются в процессе размола и имеют равномерные показатели гранулометрического состава минерала, что позволяет подобрать рецептуру огнезащитных пресс-масс, оценивать и прогнозировать образование адгезионных связей в готовой плите. Для составления сложных огнезащитных пресс-масс и получения готовых древесноволокнистых плит использовалось лабораторное оборудование: смеситель; формирующее устройство и двухэтажный лабораторный пресс. Для определения параметров пожарной опасности готовых древесноволокнистых плит с добавлением вермикулита применялся прибор ОТМ (ГОСТ 12.1.044–89).

В качестве огнезащитных средств, добавляемых в пресс-массу использовали вспученный вермикулит ГОСТ 12865-67 плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$  – сыпучий пористый материал в виде чешуйчатых частиц, получаемых ускоренным обжигом вермикулитового концентрата – гидрослюды, содержащей между элементарными слоями связанную воду.

Входным параметром эксперимента была выбрана массовая доля вспученного вермикулита,  $M_v$ , % к а.с.в., которая варьировалась от 15 до 45 %. Выходные параметры эксперимента: потеря массы образца,  $\Delta m$ , %; время достижения максимальной температуры газообразных продуктов горения,  $\tau$ , мин [5].

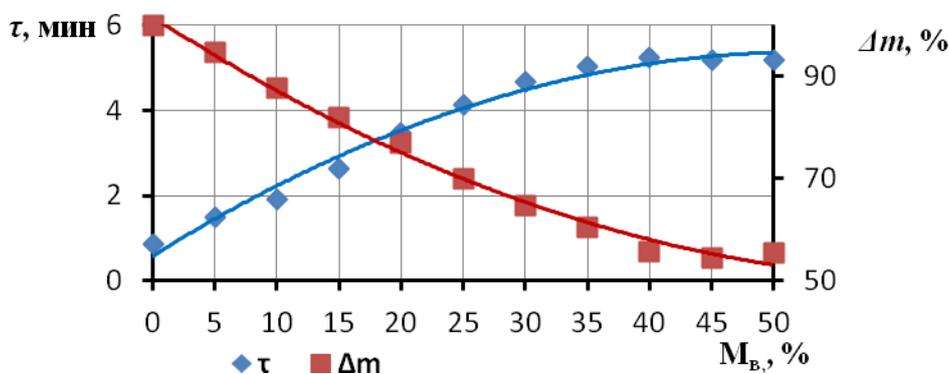


Рис. 2. Зависимости параметров пожарной опасности ДВП от массовой доли вермикулита в древесноволокнистой композиции

Как видно из представленных графиков (Рис.2), с увеличением массовой доли вермикулита в плите параметры пожарной опасности улучшаются. При значении  $M_v = 10\%$  время достижения макси-

мальной температуры газообразных продуктов горения  $\tau = 1,92$  мин, потеря массы образца составит  $\Delta m = 88\%$ . При увеличении массовой доли до  $M_g = 25\%$  величины принимают значения: время достижения максимальной температуры газообразных продуктов горения увеличивается до  $\tau = 4,14$  мин и далее с ростом массовой доли будет расти; потеря массы образца снижается до  $\Delta m = 69\%$ , то есть по ГОСТ 12.1.044-89 полученные плиты можно отнести к трудновоспламеняемым.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что использование вспученного вермикулита в качестве огнезащитного средства, добавляемого в пресс массу, является целесообразным.

### Библиографические ссылки

1. Обливин, А. Н. Перспективы развития технологии древесных плит [Текст] / А. Н. Обливин // Деревообрабатывающая пром-сть. 2000. № 3. С. 6-11.
2. Леонович А.А., Шелоумов А.В. Снижение пожарной опасности древесных материалов, изделий строительных конструкции. СПб., 2002. 59 с.
3. Чистова, Н. Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. докт. техн. наук / Н. Г. Чистова. Красноярск, 2010. 415 с.
4. Райхем, Э.А. Фибровая строительная плита, огонь и будущее [Текст] / Э.А. Райхем // Пожарный прот. ред. 1975. вып. 38. № 411. С. 67-74.
5. Пижурин А.А., Пижурин А.А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки. М., 2004. 375 с.

### References

1. Oblivin, A. N. Prospects for the development of technology of wood slabs / Text / A. N. Oblivin // Woodworking industry. 2000. No. 3. pp. 6-11.
2. Leonovich A.A., Sheloumov A.V. Reduction of fire hazard of wood materials, building construction products. St. Petersburg., 2002. 59 p.
3. Chistova, N. G. Processing of wood waste in the technological process of obtaining fiberboard: diss. doct. Technical sciences / N. G. Chistova. Krasnoyarsk, 2010. 415 p.
4. Rayham, E.A. Fibre building board, fire and future [Text] / E.A. Rayham // Fire Prot. Rev. 1975. vol. 38. № 411. P. 67-74.
5. Pyzhurin A.A., Pyzhurin A.A. Modeling and optimization of woodworking processes. M., 2004. 375 p.

© Худов Д. А., Шотов А. А., Чистова Н. Г., Матыгулина В. Н., 2022

УДК 66.041.491

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАЛЕННОГО НЕФТЯНОГО КОКСА

П. В. Черников\*, О. В. Тримасова, Н. Ю. Кожухова

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

\*E-mail: Pavel-valer@rambler.ru

*Проведен сравнительный анализ конструкций вращающихся печей мировых компаний–лидеров в данной области.*

*Ключевые слова: сырой/прокалённый кокс, вращающаяся печь, прокаливание, холодильник, качество сырья и готовой продукции.*

## ANALYSIS OF THE STRUCTURES OF ROTATING FURNACES FOR PRODUCING INCINED PETROLEUM COKE

P. V. Chernikov\*, O. V. Trimasova, N. Y. Kozhukhova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: Pavel-valer@rambler.ru

*A comparative analysis of the designs of rotary kilns by the world's leading companies in this field has been carried out.*

*Keywords: raw/calced coke, rotary kiln, calcination, refrigerator, quality of raw materials and finished products.*

Для производств черной и цветной металлургии, авиации, ракетно-космической промышленности, машиностроения, электротехники и электроники, атомной энергетики необходимы большие объемы качественных электродов.

В настоящее время для производства электродов основным сырьем является углерод, получаемый с учётом возросшего потребления нефти и нефтепродуктов из прокалённого нефтяного кокса.

Использование прокалённого нефтяного кокса позволит повысить углубление переработки сырой нефти, значительно поднять качество получаемого углерода, а также решает экологический аспект – сокращение добычи угля.

Процесс прокаливания сырого нефтяного кокса можно разделить условно на 3 фазы [1]:

- фаза 1: нагрев, испарение влаги (температура от 20 °С до 400 °С);
- фаза 2: пиролиз, удаление летучих веществ (температура от 400 °С до 800 °С);
- фаза 3: уплотнение, кристаллизация (температура от 800 °С до 1300 °С).

Главными показателями качества нефтяного кокса являются: содержание гетероатомных соединений, влаги, выход летучих веществ, гранулометрический состав, механическая прочность [1].

На основании сравнительного анализа технических решений и возможности применения предоставляемого оборудования, исходя из условий стеснённой производственной застройки, приняты для реализации следующие мероприятия по различным единицам оборудования:

### 1. Установка воздухонепроницаемых уплотнений

Оснащение места перехода воздухонепроницаемыми уплотнениями по типу Goodealseal и Superdealseal (совмещенные стальные пластины внахлест) – для исключения паразитных подсосов из окружающего воздуха во время вращения печи и холодильника.

## 2. Установка системы подачи «третичного» воздуха

Установка подачи третичного воздуха в печь и подачи вторичного и первичного воздуха для организации работы газовой форсунки (горелки), может обеспечить:

2.1 Увеличение производительности:

- типовое увеличение около 20 %, в отдельных случаях может достигать и 40 %;
- увеличение производства пара на котлах-утилизаторах.

2.2 Снижение потребления топлива (газа):

- типовое снижение 50 %, в отдельных случаях до 90 %;
- использование топлива компенсируется более эффективным горением летучих веществ;
- низкое потребление топлива – хороший индикатор эффективности технологии.

2.3 Улучшенное управление печью прокаливания:

- более однородный по качеству прокаленный кокс;
- улучшенная возможность справиться с очень изменчивым качеством входного сырья (стабилизация зоны прокаливания, температурные параметры);
- возможность вести процесс кальцинации на коксах «низкого» качества;
- безопасность ведения процесса.

2.4 Уменьшенный пылеунос пыли из печи.

- более низкие скорости газов, выходящих из печи;
- снижение абразивного воздействия пыли на конвективные трубы котла;
- снижение входных концентраций по содержанию пыли на ГОУ.
- снижение вредных выбросов в атмосферу.

Третичный воздух подается в печь через нагнетательные фурмы с помощью вентиляторов, установленных на корпусе печи для организации эффективного сжигания летучих веществ в печи. Подача воздуха вдали от разгрузочного края печи сокращает (минимизирует) степень окисления прокаленного кокса в разгрузочной зоне дополнительным воздухом, который в противном случае должен быть подан в печь через разгрузочную часть.

## 3. Футеровка печи

Стальной корпус печи изнутри футеруется огнеупорными материалами для предохранения его от воздействий высоких температур. Футеровка вращающейся печи работает в тяжелых условиях, подвергаясь истиранию перемещающейся обжигаемой массой (кокса) и резким колебаниям температуры. В области высоких температур, обеспечивающих появление в обжигаемом материале жидкой фазы (конгломерация), на поверхности футеровки может образовываться обмазка (гарнисаж) из обжигаемого материала. Футеровка во вращающейся печи попеременно в течение каждого оборота печи подвергается химическому и термическому воздействию и обжигаемого материала, и газового потока.

В наибольшей степени вышеуказанным требованиям удовлетворяют алюмосиликатные огнеупоры, основным компонентом которых является оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), а минеральную основу составляет муллит ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) [2].

Все выше перечисленные конструкционные решения, отображены на рис. 1.

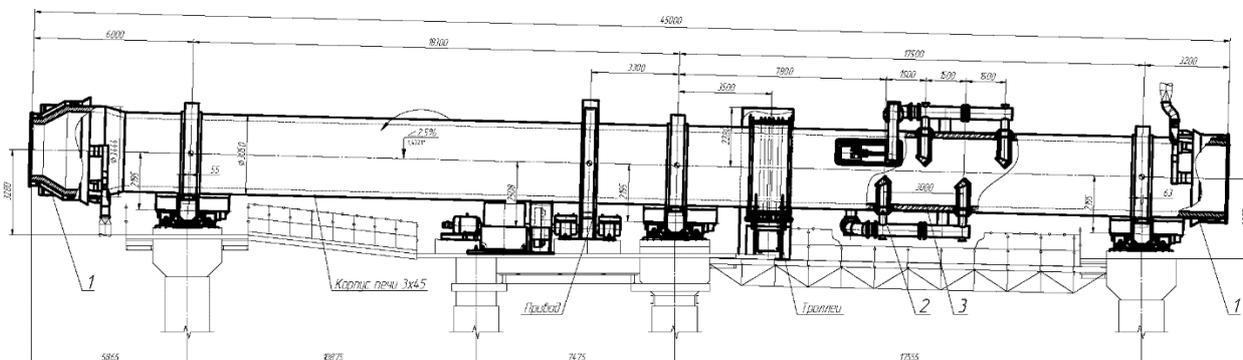


Рис. 1. Вращающаяся печь:

- 1 – воздушные дефлекторы холодной и горячей стороны печи;  
2 – подача третичного воздуха печи; 3 – огнеупорная футеровка

Вследствие возросшего мирового потребления нефти и нефтепродуктов, увеличивается и количество сырого нефтяного кокса после переработки сырой нефти на нефтеперерабатывающих заводах.

Мировой практикой подтверждается, что наиболее эффективными установками прокаливания нефтяного кокса являются барабанные вращающиеся печи [3-4].

#### Библиографические ссылки

1. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства / В. П. Твердохлебов, С. А. Храменко, Ф. А. Бурюкин [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2010. Т. 3. № 4. С. 369-386.

2. Пат. 2483259 Российская Федерация. Прокалочная барабанная печь / Гольверк С. В., Сопов Л. П., Кондратенко А. Н. № 2011152912/02 ; заявл. 26.12.2011 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15. 8 с.

3. Особенности прокаливания нефтяного и пекового кокса в печах разной конструкции / В.С. Загайнов, Р.Р. Суянов [и др.] Конф. «Нефтекокс-2011», М.

4. Ахметов, М. М. Внедрение процесса прокаливания нефтяных коксов на нефтеперерабатывающих заводах / М. М. Ахметов // журнал Мир нефтепродуктов. М, №3, 2011.

#### References

1. Petroleum coke for the aluminum industry. Technology and properties / V. P. Tverdokhlebov, S. A. Khramenko, F. A. Buryukin [et al.] // Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry. 2010. T. 3. No. 4. S. 369-386.

2. Pat. 2483259 Russian Federation. Calcining drum furnace / Golverk S. V., Sopov L. P., Kondratenko A. N. No. 2011152912/02; dec. 12/26/2011; publ. May 27, 2013, Bull. No. 15. 8 p.

3. Peculiarities of calcination of petroleum and pitch coke in furnaces of different designs / V.C. Zagainov, P.P. Suyunov [and others] Conf. "Neftekoks-2011", M.

4. Akhmetov, M. M. Introduction of the process of calcination of petroleum cokes at oil refineries / M. M. Akhmetov // Journal of the World of Oil Products. M, No. 3, 2011.

© Черников П. В., Тримасова О. В., Кожухова Н. Ю., 2022

УДК 504.06;606;674.4:674.032

## ДРЕВЕСНЫЕ ОТХОДЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД КАК СУБСТРАТ ДЛЯ БИОКОНВЕРСИИ

Г. З. Ягудина, А. С. Садаева, В. В. Тарнопольская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: gulka13020@gmail.com

*В работе рассмотрены перспективы утилизации древесных отходов различных сроков хранения методом биоконверсии с получением кормовых продуктов, обогащенных белком культурой *Pleurotus*.*

*Ключевые слова: базидиальные грибы, белок, *Pleurotus*, биоконверсия растительного сырья, лигно-углеводный комплекс.*

## CONIFEROUS WOOD WASTE AS A SUBSTRATE FOR BIOCONVERSION

G. Z. Yagudina, A. S. Sadaeva, V. V. Tarnopolskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gulka13020@gmail.com

*The paper considers the prospects for the utilization of wood waste of various storage periods by the method of bioconversion with the production of feed products enriched with protein by *Pleurotus* culture.*

*Keywords: basidial fungi, protein, *Pleurotus*, bioconversion of plant raw materials, ligno-carbohydrate complex.*

Возобновляемая растительная биомасса составляет большую часть органического материала на Земле и является практически неисчерпаемым источником сырья и энергии, основными её компонентами являются целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин.

Главным отходом деревообрабатывающих компаний в процессе механической обработки древесной породы считаются опилки хвойных пород, общий объем которых порой достигает 20 % от всего обрабатываемого сырья [1,2]. При этом, в настоящее время 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.

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 [3].

Для эффективной биоконверсии необходим отбор и исследование свойств продуцентов, способных ассимилировать основные компоненты предлагаемого субстрата. Известно, что базидиальные грибы обладают оксидоредуктазной и целлюлазной, 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 % [4,5].

Все исследуемые виды сырья обеднены белком, содержание его не достигает 1 %. Для того, чтобы в дальнейшем использовать опилки для получения кормовых добавок, следует провести обогащение

их белком и другими биологически ценными компонентами за счет биотрансформации веществ углеводной природы, содержание которых в исследуемом сырье высоко, грибным мицелием.

Микробиологическая переработка компонентов растительного сырья происходит за счет воздействия на сырье продуцентов, которые выделяют биологически активные вещества, с одновременным наращиванием биомассы продуцента. Хвойные опилки являются крупнотоннажными отходами, которые ежегодно накапливаются в Красноярском крае. Также в качестве субстрата была выбрана солома, произрастающая не только на территории Красноярского края, но и в соседних регионах, и дающая высокий урожай растительной биомассы. Известно, что пшеничная солома широко используется для твердофазного культивирования мицелия вешенок с целью выгонки плодовых тел. Данный субстрат содержит достаточно основных компонентов для активной пролиферации мицелия, способствует быстрому накоплению биомассы продуцента. Было решено использовать пшеничную солому в составе субстратных композиций для биоконверсии, чтобы активировать ферментативную систему *P. ostreatus* P.O.-4.1 и *P. columbinus*, сократить лаг-фазу при внесении инокулята и способствовать более полной конверсии субстрата.

Исходное сырье перед проведением исследования химического состава и биодеструкцией механически измельчали, за счет чего происходило увеличение его удельной поверхности. Размер частиц соломы не превышал 15 мм, опилки рассеивали на ситах, в работе использовали фракцию с размером частиц не более 10 мм.

Полученные данные свидетельствуют о снижении содержания веществ углеводной природы в опилках в динамике. Отмечается потеря до 58 % легкогидролизуемых и почти 50 % трудногидролизуемых полисахаридов в течение десятилетнего открытого хранения; при этом доля лигнина в исследуемых образцах возрастает, поскольку этот компонент сложнее всего подвергается деструкции по воздействию природных факторов. Необходимо отметить высокий потенциал пшеничной соломы как обогащающего компонента субстратной смеси за счет высокого (до 44 %) содержания полисахаридов, пригодных к ассимиляции культурой *Pleurotus*.

Содержание экстрактивных веществ в опилках снижается с 23 до 17 % при продолжительном хранении в условиях открытого полигона под воздействием, прежде всего, абиотических факторов (дожди, ветра, значительные перепады температур при смене сезонов). Таким образом, можно говорить о естественной экстракции древесных опилок на протяжении всего срока хранения. Снижение содержания экстрактивных веществ является благоприятным фактором для проведения биоконверсии, поскольку их значительное количество оказывает ингибирующее действие на культуру продуцента.

По результатам проведенного исследования содержания основных компонентов в продуктах биоконверсии с использованием зернового мицелия показало, что утилизация лигно-углеводного комплекса в процессе биоконверсии составила свыше 40 %, что позволяет оценить субстратные смеси, содержащие опилки от пяти до десяти лет хранения как перспективные для последующего использования в процессе прямой биоконверсии культурами *Pleurotus*. При этом отмечается накопление белка в продуктах биоконверсии, более высокие показатели (в среднем, до 13 % от абсолютно сухой массы) получены при конверсии субстратных смесей, содержащих опилки со сроком хранения пять и десять лет; содержание белка в таком количестве [6] позволяет рассматривать их как перспективные субстанции для получения обогащенных белком кормовых продуктов.

### 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. Сеницын А.П. Биоконверсия возобновляемой растительной биомассы на примере биотоплива второго поколения: сырье, предобработка, ферменты, процессы, экономика/ А.П. Сеницын, О.А. Сеницына. Успехи биологической химии, т61, 2021. С. 347-414.
3. Корольков, И. И. Технологическая характеристика пшеничной соломы / И. И. Корольков, И. Ф. Высоцкая Текст: непосредственный // Сборник трудов ВНИИ гидролизной и сульфитно-спиртовой промышленности. 1966. Т. 15. С. 43-52.
4. Аккерман, А. С. Плитные материалы и изделия из древесины / А.С. Аккерман, В.Н. Антакова, В.Е. Бабайлов. Москва : Колос, 1976. 360 с. Текст : непосредственный.

5. Куликова, Н. А. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты / Н.А. Куликова, О.И. Кляйн, Е.В. Степанова, О.В. Королева. // Москва : Вестник. 2011. Т. 47. №6. С. 619-634. Текст : непосредственный.

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. №4. С. 405-411. DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.

### References

1. Bayandin, M. A. The influence of mechanical activation on the autohesion properties of wood / M. A. Bayandin, V. N. Ermolin, S. G. Eliseev Text: direct // Coniferous boreal zones. 2013. Vol. 31 No. 1-2. pp. 159-163.

2. Sinitsyn A.P. Bioconversion of renewable plant biomass on the example of second-generation biofuels: raw materials, preprocessing, enzymes, processes, economics/ A.P. Sinitsyn, O.A. Sinitsyna. Advances in Biological Chemistry, t61, 2021. pp. 347-414.

3. Korolkov, I. I. Technological characteristics of wheat straw / I. I. Korolkov, I. F. Vysotskaya Text: direct // Proceedings of the Research Institute of hydrolysis and sulfite-alcohol industry. 1966. Vol. 15. pp. 43-52.

4. Akkerman, A. S. Slab materials and wood products / A.S. Akkerman, V.N. Antakova, V.E. Babailov. Moscow : Kolos, 1976. 360 p. Text : direct.

5. Kulikova, N. A. The use of basidial fungi in technologies of processing and utilization of technogenic waste: fundamental and applied aspects / N.A. Kulikova, O. And Klein, E.V. Stepanova, O.V. Koroleva. // Moscow : Vestnik. 2011. Vol. 47. No. 6. pp. 619-634. Text : direct.

6. Technology of microbiological processing of plant raw materials by *Pleurotus* cultures to obtain feed products / V. V. Tarnopolskaya, T. V. Ryazanova, N. Y. Demidenko, etc. // Chemistry of plant raw materials. 2020. No.4. pp. 405-411. DOI: 10.14258/jcprm.2020048445.

## СОДЕРЖАНИЕ

Секция

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

<b>Ануфриенко В. Е., Волков М. В., Наденин И. О., Филиппов А. А.</b> Способ подготовки поверхности металлических фитингов к склеиванию с трубами из композиционного материала .....	6
<b>Барсук В. Е., Смирнов Д. Н., Чемезов В. Л., Шейфер С. В.</b> Расчетно-экспериментальные исследования авиационно-космической техники в СибНИА им. С. А. Чаплыгина .....	9
<b>Бордачев В. А., Рожкова Е. А., Кольга В. В.</b> Предотвращение возникновения кавитации в заборном устройстве .....	12
<b>Бордачев В. А., Рожкова Е. А., Кольга В. В.</b> Метод определения положения центра давления модельной ракеты .....	15
<b>Виноградова Е. А., Демина А. Ю.</b> Разработка малой экспериментальной ракеты «Veloх» как практико-ориентированный метод обучения студентов .....	18
<b>Гераськина М. Е., Казакова Т. Ю., Непомнящий Ю. Г., Цытыркин Н. Г., Титаренко С. А.</b> Способы резки криволинейной поверхности рефлектора, изготовленного методом РТМ-технологии .....	20
<b>Козлов В. С., Котельникова С. В.</b> Устройство для измерения тяги сопла .....	24
<b>Колмаков А. В., Внуков А. А.</b> Применение космической тросовой системы при обслуживании пассивного космического аппарата .....	27
<b>Коловский И. К., Шмаков Д. Н.</b> Анализ маневра довыведения космического аппарата при построении глобальной спутниковой системы на низкой круговой орбите .....	30
<b>Майоров В. В., Чепель Г. А., Демина А. Ю.</b> Проектирование системы стабилизации угловой скорости по каналу крена студенческой экспериментальной ракеты .....	32
<b>Марчук М. Е., Лыкум А. И., Наденин И. О., Кустов К. С.</b> Проектирование кронштейна крепления оптического блока космического аппарата с использованием метода топологической оптимизации .....	36
<b>Петрушкин А. А., Кремзуков Ю. А.</b> Разработка имитационной модели для проверки времени зарядки литий-ионной аккумуляторной батареи малого космического аппарата .....	39
<b>Похабов А. Ю., Иконникова А. А.</b> Способ изготовления сотового заполнителя бесклеевым методом для производства трехслойных конструкций .....	43
<b>Прохоров В. В.</b> Авиатранспортное средство новых возможностей .....	46
<b>Рожкова Е. А., Бордачев В. А., Драганиук М. Н.</b> Исследование чрезвычайных ситуаций в истории отечественной ракетно-космической отрасли .....	49
<b>Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е.</b> Влияние лазерной обработки титановых сплавов на прочность клеевого соединения с углепластиком .....	52
<b>Савельев Д. О., Михеев А. Е., Гирн А. В., Раводина Д. В.</b> Влияние формы изделия при микродуговом оксидировании на массовые характеристики покрытия .....	56
<b>Смирнов П. Н.</b> Касательная жесткость пружины растяжения – сжатия .....	59
<b>Соколова А. О., Майоров В. В., Фадеев П. В.</b> Применение композиционных материалов в экспериментальном ракетостроении для оптимизации конструкций .....	62
<b>Фаворский В. С.</b> Выявление области неоднозначности структуры пространственного взаимодействия встречных неодинаковых сверхзвуковых струй .....	65
<b>Фаворский В. С.</b> Исследование аэродинамических характеристик модели перспективного самолета на УЛАК-1 .....	67
<b>Шамлицкий А. Я.</b> Перспективные технологии использования композиционных материалов в РКТ .....	70
<b>Шатных К. П., Елизарьева М. Г., Коваленко Г. Д.</b> Анализ сельскохозяйственной обработки с применением БПЛА .....	73
<b>Шатов А. В., Пикулин С. А.</b> Влияние отклонения толщин слоев композитного материала на свойства пакета слоев .....	76

Секция  
**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

<b>Бардаев П. П., Бурнышева Т. В., Данилов М. Н.</b> Тензометрическая система контроля усилий в подвижных элементах крупногабаритных трансформируемых космических конструкций .....	80
<b>Белов О. А., Белоглазов А. П., А. Г. Еремин А. Г., Верстаков А. В.</b> Создание крупногабаритных ферм, разворачиваемых в космосе трансформируемых углепластиковых элементов .....	84
<b>Бернс В. А., Годин А. И., Жуков Е. П., Красноруцкий Д. А., Лакиза П. А., Лысенко Е. А., Пара А. В., Шкода А. В.</b> К вопросу коррекции расчетных моделей летательных аппаратов .....	87
<b>Бернс В. А., Годин А. И., Жуков Е. П., Красноруцкий Д. А., Лакиза П. А., Маринин Д. А., Пара А. В., Шкода А. В.</b> Применение операционного модального анализа для определения динамических характеристик летательных аппаратов .....	90
<b>Двирный Г. В., Двирный В. В., Шевчук А. А., Елфимова М. В., Снежко А. А.</b> Метод защиты технических объектов в условиях северных широт от просадки грунта на основе термосифонов .....	93
<b>Задорин И. А., Воронина С. Ю., Семенуха О. В., Симунин М. М.</b> Модификация модуля испытательного стенда для исследования электрического сопротивления полимерных композиционных материалов .....	96
<b>Зимин В. Н., Крылов А. В., Филиппов В. С., Шахвердов А. О.</b> К вопросу создания привода из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций .....	99
<b>Иголкин А. А., Филипов А. Г.</b> Расчетно-экспериментальный метод отработки динамической прочности конструкции МКА .....	102
<b>Ковальчук Л. М., Бурнышева Т. В., Шайдуров С. В.</b> Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотропной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при кручении .....	104
<b>Ладыгин А. П., Порпылев В. Г., Надежин М. И., Юдина З. А., Ширококов О. В.</b> Результаты испытаний опытного образца электронасосного агрегата космического аппарата с применением методов искусственного интеллекта в задаче диагностики его технического состояния .....	107
<b>Литвинцева А. А., Чеверда В. В., Вожаков И. С.</b> Экспериментальное исследование режимов течения в пульсационной тепловой трубе .....	110
<b>Лихачев А. Н.</b> Теоретические основы исследования и разработки гибких композиционных конструкций с управляемыми физико-механическими характеристиками .....	112
<b>Марченко Е. С., Ковалёва М. А., Байгонакова Г. А., Пономарев С. В.</b> Перспективы применения материалов из никелида титана с памятью формы в аэрокосмической области .....	115
<b>Моисеев П. П., Викторов А. И., Бабанков Д. А.</b> Управляемое механическое тормозное устройство для развертывания панелей солнечных батарей космического аппарата .....	118
<b>Моисеев П. П., Викторов А. И., Смирнов В. А., Нечушкин И. И.</b> Компрессионные отрывные электрические соединители для разделяемых конструкций космического аппарата .....	120
<b>Овчар А. В.</b> Прорывное движение без пропеллента: физические принципы создания тяги в двигателе на основе К-резонатора с помощью адаптера/интерфейса к дополнительным измерениям Вселенной .....	122
<b>Овчар А. В.</b> Прорывное движение без пропеллента: аномальная тяга в двигателе на основе V-резонатора .....	125
<b>Павелко С. В., Силиванов Р. П., Замятин Д. А., Грибков И. С., Улыбушев Е. А.</b> Разработка привода батареи солнечной для малых космических аппаратов .....	127
<b>Пикулин С. А.</b> Программа для расчета рациональной схемы армирования композитной трубы .....	131
<b>Покудин С. В., Бабушкина Д. В.</b> Разработка электропривода для системы ориентации солнечной батареи космического аппарата .....	134
<b>Похабов Ю. П.</b> О надежности трансформируемых конструкций .....	137
<b>Семенуха О. В., Бриль И. И., Воронина С. Ю.</b> Повышение адгезионной прочности на границе «волокно-матрица» полимерного композиционного материала .....	139
<b>Серяков А. В., Алексеев Анд. П.</b> Численные исследования работы испарителей тепловых труб .....	142
<b>Сыпачев В. Р., Зыков А. С.</b> Исследование стабильности воздушного зазора бескорпусного гибридного шагового двигателя космического аппарата .....	146
<b>Тоньшина А. В., Шалыгина Т. А.</b> Шарнирный узел с применением упругой пластины .....	148
<b>Шевчук А. А., Бутов В. Г., Двирный В. В., Пастушенко О. В., Рудько А. А.</b> Термостабилизация светового источника имитатора солнечного излучения в термовакуумной камере с применением контурных тепловых труб .....	150
<b>Шендалев Д. О., Пикулин С. А.</b> Алгоритм выбора схемы армирования штанги крупногабаритного трансформируемого рефлектора .....	153

## Секция

«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»

<b>Горячкин Е. С., Кудряшов И. А., Щербань А. И., Новикова Ю. Д.</b> Анализ влияния клапана перепуска воздуха на характеристику осевого компрессора .....	158
<b>Давыдик В. А., Орешкин Д. И., Рабецкая О. И.</b> Разработка метода расчёта гидродинамического подшипника скольжения .....	161
<b>Данилов Н. А., Аригольд А. А., Зуев А. А., Гоголев В. О.</b> К методике экспериментального исследования теплоотдачи в пространственных каналах .....	164
<b>Данилов Н. А., Зуев А. А., Гоголев В. О., Федченко Т. А.</b> Движение воздушного потока на повороте в девяносто градусов .....	167
<b>Жариков К. И., Дронь М. М.</b> Определение проектных параметров ракетной двигательной установки с электрореактивной тягой .....	169
<b>Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Казаков Р. А., Фесенко И. А., Назаров В. П.</b> Анализ механических характеристик материала корпуса камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом 3D-печати .....	172
<b>Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Казаков Р. А., Шестов Н. С., Дергач И. В.</b> Металографический анализ камеры, изготовленной методом 3D-печати .....	175
<b>Зубанов В. М., Харитонов А. А.</b> Исследование влияния перепускных клапанов на характеристики осевого компрессора .....	178
<b>Каширцев В. В., Бутрим В. Н., Силис М. И., Трушникова А. С., Берг А. А.</b> Исследование влияния структуры хромоникелевого сплава на электрическое сопротивление капиллярной трубки .....	181
<b>Кудряшов И. А., Горячкин Е. С., Тюрина Д. С.</b> Исследование влияния надроторного устройства на характеристики ступени компрессора .....	183
<b>Манохина Э. С., Шикарев М. А., Рубайло А. П., Фоменко А. А., Гордеев В. В.</b> Анализ результатов рентгенографических исследований изделий РКТ изготовленных методом SLM-печати .....	186
<b>Мельников С. А., Зубанов В. М., Харитонов А. А.</b> Проектирование регенеративного охлаждения камеры ракетного двигателя с учётом теплового и прочностного состояний .....	188
<b>Назаров В. П., Пиунов В. Ю., Голиковская К. Ф., Назарова Л. П.</b> Имитационное моделирование условий стендовых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги .....	191
<b>Новикова Ю. Д., Мельников С. А., Доценко А. Ю.</b> Влияние величины отбора воздуха на газодинамические характеристики осевого компрессора .....	193
<b>Рутковская М. А., Рутковский В. О., Насибуллин О. И.</b> Высотная коррекция двигателя беспилотного летательного аппарата .....	196
<b>Рутковский В. О., Насибуллин О. И., Рутковская М. А.</b> Дроссельная заслонка с двумя интегрированными форсунками .....	198
<b>Фесенко И. А., Дергач И. В., Бривкальн П. А., Казаков Р. А., Шикарев М. А.</b> Постобработка камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного по технологии SLM-печати .....	201
<b>Фесенко И. А., Дергач И. В., Жигурова Е. Е., Мумбер К. Е., Назаров В. П.</b> Разработка технологического процесса испытаний камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги на прочность и герметичность .....	203
<b>Фоменко А. А., Гордеев В. В., Бривкальн П. А., Шестов Н. С., Манохина Э. С.</b> Изготовление камеры ракетного двигателя методом аддитивных технологий. ....	205
<b>Харитонов А. А., Щербань А. И., Зубанов В. М.</b> Влияние геометрии выходной области осевой малоразмерной турбины на ее характеристики .....	208
<b>Черненко В. В., Черненко Д. В.</b> Применение баланса мощностей при исследовании проточной части центробежного насоса .....	211
<b>Шелудько М. Л., Назаров В. П., Зенюк К. О., Назарова Л. П.</b> Проверка и моделирование параметров процесса работы в газогенераторах наддува топливных баков ЖРДУ .....	214
<b>Шестов Н. С., Бривкальн П. А., Фоменко А. А., Талай Е. П., Гордеев В. В.</b> К особенностям проектирования камеры ракетного двигателя малой тяги при использовании аддитивных технологий .....	217
<b>Шикарев М. А., Манохина Э. С.</b> Особенности методики расчёта энергомассовых характеристик электронасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей .....	219

Секция  
**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНСТРУКЦИЯХ  
 ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
 И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

<b>Белявский А. Е., Борщев Н. О.</b> Оптимизация проектных параметров радиационного теплообменника системы обеспечения теплового режима лунной базы в условиях параметрической неопределенности .....	223
<b>Борщев Н. О., Белявский А. Е.</b> Обратные задачи в проектировании теплового режима теплоизоляционных материалов .....	225
<b>Булов А. О.</b> Использование рекуперативного теплообменного аппарата для повышения холодопроизводительности .....	228
<b>Булов А. О.</b> Турбулизация как способ интенсификации процесса теплообмена .....	231
<b>Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А.</b> Влияние образования инея на характеристики теплообменника .....	234
<b>Васильев Е. Н., Емельянов Д. П.</b> Особенности стекания воды из наклонного щелевого канала при таянии инея .....	237
<b>Делков А. В., Танасиенко Ф. В., Мелкозеров М. Г.</b> Одномерная модель комплексной теплопередачи системы терморегулирования космических аппаратов .....	240
<b>Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Шагеева А. А., Абдулаев М. У.</b> Дифференциальная модель потерь на трение в рабочем колесе ступени центростремительной турбины .....	243
<b>Енков М. О., Горбенко Т. И., Горбенко М. В.</b> Топлива на основе термитных систем для двигателей малой тяги .....	246
<b>Капуцак К. И., Келлер А. И.</b> Система аварийного дымоудаления: назначение, конструкция, принцип действия .....	249
<b>Капуцак К. И., Келлер А. И.</b> Особенности и преимущества систем кондиционирования канального типа .....	252
<b>Кругления А. И., Деткина А. П.</b> Использование термоэлектрических преобразователей в автоматизированных системах .....	255
<b>Черненко В. В., Черненко Д. В.</b> Метод интегрирования уравнений импульсов при развороте потока .....	257
<b>Черненко В. В., Черненко Д. В.</b> К расчету энергетических характеристик решеток центробежных насосов .....	260
<b>Шевченко Ю. Н., Келлер А. И., Капуцак К. И., Шагеева А. А., Абдулаев М. У.</b> Математическая модель дифференциальных потерь на трение в направляющем аппарате микротурбины с тепловым возвратом по энтальпии .....	263
<b>Шилкин О. В., Кишкин А. А.</b> Теплообмен двухфазного потока в системах терморегулирования космических аппаратов .....	266
<b>Щербина О. В.</b> Дистанционная регистрация ультразвуковых сигналов, генерируемых импульсными пучками заряженных частиц .....	269

Секция  
**«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»**

<b>Вехов А. С., Некрасова Т. Л., Титаренко С. А.</b> Способ изготовления деталей типа цапга из бериллиевой бронзы .....	273
<b>Власенко А. В., Косырева А. И.</b> Практическое применение нанопористых пленок .....	276
<b>Вотьяков К. А., Надежин М. Н., Карабонцева М. В., Карабонцева Н. В., Мацур Г. А.</b> Контроль геометрических характеристик сферических ДСЕ с помощью координатно-измерительных машин .....	279
<b>Денисов В. В., Денисова Ю. А., Коваль Н. Н., Ковальский С. С., Леонов А. А., Игнатов Д. Ю., Островерхов Е. В., Тересов А. Д., Тищенко В. Н., Савчук М. В., Яковлев В. В.</b> Повышение износостойкости поверхности материалов и изделий комбинированными методами пучково-плазменной инженерии .....	282
<b>Леонов А. А., Денисова Ю. А., Денисов В. В., Тищенко В. Н., Савчук М. В.</b> Управление фазовым составом азотированных легированных сталей .....	285
<b>Лузанов О. Р., Снежко А. А.</b> Технологические особенности послойного синтеза металлических деталей .....	288
<b>Лузанов О. Р., Снежко А. А.</b> Влияние химического состава деталей на технологические возможности послойного синтеза дуговой наплавкой .....	292

<b>Надежин М. Н., Харина А. А., Карабонцева М. В., Карабонцева Н. В., Мацур Г. А.</b> Контроль угловых и линейных перемещений подвижных частей станков с помощью лазерного трекера .....	296
<b>Остапенко Д. В., Толстопятов М. И.</b> Сравнительный анализ методик термодинамического расчета жидкостных ракетных двигателей .....	298
<b>Первова И. Н.</b> Технологические особенности ротационной вытяжки крупногабаритных корпусных элементов сферической формы из алюминиевого сплава АМГ6 .....	301
<b>Раменский В. В.</b> Заточка сферической борфрезы .....	303
<b>Рыжиков Н. С.</b> Улучшение статических и динамических характеристик агрегатов рулевого привода ракетных двигателей .....	305
<b>Савчук М. В., Денисов В. В., Денисова Ю. А., Леонов А. А., Скосырский А. Б.</b> Свойства однослойных и многослойных покрытий, полученных вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом .....	308
<b>Смирнов А. Н., Дюкарев А. Ю.</b> Повышение работоспособности деталей подвижных сопряжений за счет создания и модификации поверхностных слоев методами комбинированных технологий .....	311
<b>Сызганов В. С., Мерзляков В. В.</b> Применение аддитивных технологий для изготовления изделий из полимерных материалов (фторопластов) .....	314
<b>Титенков С. В., Журавлев В. Ю.</b> Использование узкоспециализируемых узлов в агрегате гибки тонкостенных труб .....	316
<b>Торгашин А. С.</b> К вопросу аппроксимации данных гидравлических испытаний .....	318
<b>Удод Л. С., Мезенцева Н. В.</b> Разработка метода соединения полимерных композиционных материалов .....	320
<b>Федченко Т. А., Данилов Н. А., Халеков Я. А.</b> Использование аддитивных технологий в отечественном и зарубежном производстве .....	323
<b>Халеков Я. А., Данилов Н. А., Федченко Т. А.</b> Аддитивные технологии для производства ракетно-космической техники в зарубежном производстве .....	325
<b>Чуватов А. П.</b> Способы ремонта штырей многоконтактной электрической вилки .....	327
<b>Швалева Н. А., Фадеев А. А.</b> Точность электрохимического формообразования полостей тонкостенных деталей профильным катодом-инструментом .....	329

## Секция

## «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»

<b>Абрамчик Д. Д., Шпигер Н. В., Гаипов К. Э.</b> Математическая модель для поиска оптимального распределения информационных потоков при минимальной сумме пропускных способностей .....	333
<b>Голубев Е. Н.</b> Реконфигурация компьютерных сетей КА АО «ИСС» .....	336
<b>Гринь И. В., Морозов О. А., Пинегина Н. А.</b> Применение критерия согласованности временных задержек при оценке навигационных параметров множественных источников радиоизлучения .....	340
<b>Жуков А. О.</b> Основные погрешности навигации по телам солнечной системы .....	343
<b>Карцан И. Н.</b> Системы маяков или навигационные спутниковые системы .....	346
<b>Креков С. Д., Боев Н. М., Изотов А. В.</b> Методика автоматизированного расчета бюджета канала ближнеполюсной магнитной системы связи .....	349
<b>Негодеева И. А., Боев Н. М.</b> Расчет параметров индукционного магнитометра .....	352
<b>Федоров М. С., Широков А. Д., Феоктистов Д. А., Смирнов А. В.</b> Сенсорные сети на базе микроконтроллера Attiny13 .....	355
<b>Шатров А. К., Фисенко Е. Н., Рабецкая О. И.</b> Отработка теплового режима спутников связи .....	357

## Секция

## «КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

<b>Максютин А. С., Казайкин Д. С., Дымов Д. В.</b> Разработка программно-аппаратных имитаторов трафика SpaceWire для испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов .....	361
<b>Севостьянов Н. А., Горбунов Р. Л.</b> Двукратное регулирование напряжения в системе электроснабжения космического аппарата с цифровой системой управления .....	364
<b>Шахматов А. В., Ханов В. Х.</b> Построение бортовой авионики наноспутника Reshucube-1 .....	367

## Секция

## «ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Голованов С. М., Орлов В. И., Федосов В. В. Использование понятия однородности 2-го рода при испытаниях электронной компонентной базы космического применения .....	370
Ложников А. О. Термостатированные кварцевые генераторы для специальных применений .....	374
Лужайцев Д. А., Туров А. О., Хохол Д. С., Миллер Ю. А., Лужайцева Э. О. Монолитная интегральная схема усилителя мощности по технологии 0,25 мкм GaN HEMT .....	376
Никитина Л. Н., Трифанов В. И., Бельман А. В., Трифанов И. В. Рекуператоры энергии ионов плазмы .....	379
Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Ештокина А. И. Исследование процессов фазообразования в керамике $Al_2O_3+MgO$ , полученной методом SPS .....	381
Савельев Ю. Н. Особенности производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в полимерных корпусах .....	384
Трифанов В. И., Новосельская Е. К., Трифанов И. В., Патраев Е. В. Преобразование СВЧ-энергии в постоянный электрический ток .....	387
Хамидуллина Н. М., Зефирин И. В., Черников П. С. Параметры одиночных эффектов, создаваемых потоком нейтронов от радиоизотопных источников на борту межпланетных КА .....	389
Черников П. С., Хамидуллина Н. М., Зефирин И. В. Параметры одиночных эффектов, создаваемых ионизирующими излучениями космического пространства при полете межпланетных КА .....	392

## Секция

## «КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»

Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Марицкий Н. Н., Сунцов С. Б. Метод неразрушающего контроля радиоэлектронного оборудования КА .....	396
Городилов А. А., Семёнов Э. В. Использование нелинейных свойств обжимных соединений при контроле качества кабельных изделий космической техники .....	399
Горайнова А. А., Миронович Я. В. Вакуумно-откачные системы .....	402
Ковкин И. В., Москаленко Н. В., Кремзуков Ю. А. Автоматизированный контроль изоляции в системах электропитания космических аппаратов .....	405
Феоктистов Д. А., Орешенко Т. Г., Баранова Е. Г., Федоров М. С., Широков А. Д. Особенности верификации сервоприводов .....	408
Цивилев И. Н., Шангина Е. А. Модель для управления рисками при проведении электротермовакuumных испытаний космических аппаратов .....	410
Шевчук А. А., Двирный В. В., Майбах М. С., Санько С. А., Павлова А. А. Разработка светодиодной сборки имитатора внеатмосферного солнечного излучения .....	412

## Секция

«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ»

Белехов С. С., Агафонова О. Е., Попов М. Е., Ханов В. Х., Дорогайкина Е. М. Проектирование МКА Cubesat. фаза А .....	416
Белов С. В., Бельков А. В., Жуков А. П., Павлов М. С., Пономарев С. В. Тепловое состояние спутника cubesat при различной плотности расположения электронных плат .....	419
Зув Д. М., Ханов В. Х. Организация летных экспериментов на борту космического аппарата ReshUCube-1 .....	422
Кададова А. В., Кадочников Д. М., Уткин В. В., Гончаров В. О. Разработка полезной нагрузки для микроспутника формата CubeSat .....	425
Кадочников Д. М., Уткин В. В., Кададова А. В., Гончаров В. О. Создание центра управления полетом малых космических аппаратов в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова» .....	428
Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е. Проект космического аппарата форм-фактора Cubesat с экспериментальным криогенным модулем .....	431
Кустов Н. Д., Евдокимов К. С. Определение стека сетевых протоколов и технологий для космических интегрированных сетей .....	434
Лапухин Е. Г., Калмыков А. П., Аброськин В. В., Подобайлова В. А. Автоматизация поворотного механизма антенн для обеспечения связи с кубсатами университета .....	437

<b>Лапухин Е. Г., Чекмарев С. А., Шахматов А. В., Аброськин В. В., Подобайлова В. А., Калмыков А. П.</b> Особенности организации УКВ-связи с Reshucube-1 в СЦУП СибГУ им. М. Ф Решетнева .....	440
<b>Лукьянов М. М.</b> Оценка возможности активного аэродинамического управления формацией наноспутников .....	443
<b>Малыгин Д. В.</b> Разработка системы мониторинга потока заряженных частиц для анализа трассы полета спутника .....	446
<b>Учеватов В. И.</b> Исследование теплового режима и постановка экспериментов космического аппарата Reshucube-1 .....	449
<b>Ханов В. Х., Зуев Д. М., Шахматов А. В., Чекмарёв С. А., Лепешкина Е. С.</b> Предварительные результаты космической миссии Reshucube-1 .....	452

## Секция

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

<b>Бабий И. А.</b> Оптимизация гиперпараметров модели Random Forest для обучения алгоритма оценивания биомассы .....	456
<b>Бабий И. А., Гончаров А. Е.</b> Пространственная привязка сонограмм гидролокатора Starfish .....	458
<b>Бахтина А. В.</b> Анализ методик проверки гипотезы о независимости случайных величин .....	461
<b>Беляев Р. Р.</b> Методы раннего обнаружения дыма природных пожаров по визуальным данным с помощью нейронных сетей .....	465
<b>Данилова И. В., Буренина Т. А.</b> Использование Google Earth Engine при расчете эвапотранспирации в бассейне реки Подкаменная Тунгуска .....	468
<b>Им С. Т., Ли В. Г.</b> Динамика вегетационных индексов и климатические тренды в Хакасии .....	470
<b>Им С. Т.</b> Связь динамики лесных территорий Хакасии с рельефом местности .....	473
<b>Кадочников А. А.</b> Развитие системы сбора данных для задач анализа состояния атмосферного воздуха .....	476
<b>Котцова А. С.</b> Динамика водных поверхностей северо-западной части Таймырского полуострова с конца 20 века .....	479
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Модифицированный непараметрический алгоритм автоматической классификации данных большого объёма .....	482
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Непараметрическая методики проверки гипотезы о распределениях случайных величин .....	486
<b>Никитин А. В.</b> Геоинформационный анализ динамики темнохвойных лесов Хакасии в 21 веке .....	489
<b>Перевозчикова Е. Е., Соколов Е. П., Охоткина Е. А.</b> Разработка туристической карты-схемы с применением ГИС-технологий .....	491

## Секция

**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

<b>Андреев М. А., Шелопугин С. Д., Чирков П. Р.</b> Влияние геометрии профиля крыла экраноплана на его свойства .....	495
<b>Афанасьева А. В., Сяков Е. Е., Сяков В. Е.</b> Модернизация водяной системы самолета Embraer 170 .....	499
<b>Афанасьева А. В., Сяков Е. Е., Сяков В. Е.</b> Анализ деятельности авиакомпании «S7 Airlines» в современных условиях .....	502
<b>Идиятуллин Д. А., Тришин С. С., Бойко О. Г., Ачкасова Е. А.</b> Анализ отказов и неисправностей силовой установки самолета МИГ-31БМ по статистическим данным истребительного авиационного полка .....	505
<b>Иконников Е. А., Ковалистов А. С., Сочнев Н. Н., Рослик С. И., Шакаль А. Н.</b> Исследование вторичной системы тока 115/200в на самолетах Ан-24 Ан-26 Ан-30 .....	507
<b>Ковалистов А. С., Сочнев Н. Н., Рослик С. И., Шакаль А. Н., Акзигитов Р. А.</b> Проработка систем для обеспечения полетов в сложных метеоусловиях самолетов малой авиации .....	509
<b>Коптев А. Н., Валиев С. Э., Муминов А. А.</b> Совершенствование технологического оценивание и диагностики ВС путём внедрение нейронных сетей для решение задачи контроля и выявление отказов систем электроснабжения самолёта B787 .....	512

<b>Крашенинникова О. В.</b> Эксплуатация датчиков силы и момента в авиационной технике .....	515
<b>Кунин И. С., Ананько Д. Г., Ананько И. Д.</b> Доработка авионики G1000 в самолете CESSNA 208B для работ в высоких широтах .....	518
<b>Коваленко Г. Д., Елизарьева М. Г., Меркулов С. И.</b> Испытательный комплекс эксплуатационных характеристик цилиндрических вихревых двигателей БПЛА .....	520
<b>Попов Д. М., Тимохович А. С.</b> Оптимизация процесса поиска неисправностей автопилота ВС ATR-42 .....	523
<b>Сочнев Н. Н., Иконников Е. А., Рослик С. И., Шакаль А. Н., Ковалистов А. С.</b> Развитие импортозамещения в области гражданской авиации .....	525
<b>Федоров С. В., Солодкин А. В., Чурбаков Ю. В., Плотников Д. А., Бойко О. Г.</b> К вопросу об организации внешней линейной станции технического обслуживания воздушных судов .....	528
<b>Цапиенко А. С.</b> Эксплуатация датчиков времени аэрокосмических устройств .....	531
<b>Эргашева М. З., Чижевская М. В.</b> Международный опыт применения металлов в авиастроении .....	534

## Секция

## «ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

<b>Большаков Р. С., Каргапольцев С. К.</b> Особенности вибрационного перемещения рабочей среды .....	538
<b>Вервейко Д. С., Браверман В. Я., Злобин С. К., Гусев В. Ю., Оборонов В. В.</b> Качество сварного шва заготовки гибкой волноводной секции космического аппарата .....	541
<b>Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Вакулин М. С., Усевич Н. И., Казаков И. С.</b> Влияние условий резания на шероховатость поверхности при высокоскоростном фрезеровании композиционных материалов .....	543
<b>Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Кривов Д. А., Филиппов С. В., Тимошев П. В.</b> Модернизация конструкции рабочих органов валковой дробилки .....	546
<b>Горшкалев Д. А., Исаев А. П., Амельченко Н. А.</b> Проблемы использования композиционных материалов при изготовлении ракетно-космической техники .....	549
<b>Горшкалев Д. А., Амельченко Н. А.</b> Особенности получения диаметральных размеров при печати модели методом послойного наплавления .....	552
<b>Гришин А. А., Павелко С. В., Сыпачев В. Р.</b> Изнашивание гальванического покрытия токопроводящих колец токосъемных устройств космических аппаратов .....	555
<b>Даныкин В. В., Козырев А. С.</b> Приспособление для базирования и закрепления заготовок по внутреннему диаметру .....	558
<b>Деткина А. П., Круглень А. И.</b> Схемы ротационного точения .....	560
<b>Жигарева А. А., Евстифейкин А. И., Раменская Е. В.</b> Оценка параметров качества поверхностного слоя детали после механической обработки .....	563
<b>Иванов П. А., Левко В. А.</b> Анализ шероховатости и микротвердости внутренней поверхности латунной прямоугольной заготовки до и после обработки абразивным потоком .....	566
<b>Исаев А. П., Горшкалев Д. А., Сороковиков В. А., Осипова В. А., Зверинцева Л. В.</b> Исследование износа инструмента при электроэрозионной обработке .....	569
<b>Левко В. А., Теряев Н. С.</b> Технологии финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей .....	572
<b>Литовка О. В., Левко В. А.</b> Обзор мирового опыта моделирования контактных взаимодействий процесса обработки абразивным потоком .....	578
<b>Маркелов И. А.</b> Устройство для испытаний привода раскрытия трансформируемого рефлектора .....	581
<b>Панаськов А. О., Шумилина Я. Е.</b> Исследование переходной функции бионического двигателя .....	584
<b>Поляковская А. В., Карсакова А. А., Колесникова А. А.</b> Композиционные материалы в машиностроении .....	587
<b>Репин С. В., Орлов Д. С.</b> Построение упругой характеристики беспробойного пневмогидравлического амортизатора в подвеске транспортно-технологической машины .....	589
<b>Романовская Л. М.</b> Проблемы импортозамещения в области микроэлектроники .....	592
<b>Суханова О. А., Новосельская Е. К., Патраев Е. В., Трифанов И. В.</b> Вибрационное анодно-абразивное полирование деталей машин магнитоуправляемыми заряженными частицами .....	595
<b>Суханова О. А., Малько Л. С.</b> Разработка математической модели процесса позиционирования круговой подачи при нарезании витков глобоидных червяков .....	597
<b>Суханова О. А., Малько Л. С., Карелина Е. А.</b> Устройство к зубофрезерному станку для позиционирования круговой подачи при нарезании витков глобоидных червяков .....	600

<b>Шалаев П. О., Квеглис Л. И., Носков Ф. М., Жереб В. П., Эренчин К. М.</b> Влияние ударно-волнового нагружения на состояние композита Cu-Mo .....	603
<b>Шумилина Я. Е., Панаськов А. О.</b> Адаптивный алгоритм подхода схвата и определение расстояния до объекта на основании потокового изображения .....	606
<b>Щербина А. С., Ткачёва А. Е., Потапова В. О., Щербина Е. В., Жирнова Е. А.</b> Выбор средств измерений для контроля гладких калибров .....	609
<b>Щербина Е. В., Щербина А. С., Ткачёва А. Е., Потапова В. О., Снежко А. А.</b> Проблемы контроля качества сварных соединений деталей сложной конфигурации и методы их устранения .....	612
<b>Юшкова (Белоногова) О. В., Безруких А. И., Жереб В. П., Степаненко Н. Е., Сапарова А. С.</b> Исследование модифицирующей способности алюминиевых сплавов системы Al-Ti-Nb .....	615

## Секция

## «МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ»

<b>Аринчев С. В.</b> 2D-моделирование динамического процесса лазерной резки крупногабаритного объекта космического мусора в невесомости .....	619
<b>Ереско В. С., Ереско С. П., Ереско Т. Т., Терсков Д. Ю.</b> Технологическая подготовка производства уплотнений элементов гидропривода .....	622
<b>Ереско С. П., Иванов Ю. Ф., Клопотов А. А., Лопатин И. В., Лыков С. В.</b> Структура и свойства высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом .....	627
<b>Ереско А. С., Терсков Д. Ю., Ереско С. П.</b> Модернизация лабораторного стенда ГПС-01 .....	630
<b>Поляков Н. А., Чулкин С. Г., Ереско С. П., Терсков Д. Ю.</b> Влияние величины допускаемых предельных отклонений размеров труб на качество и сроки монтажа трубопроводов .....	634
<b>Поляков Н. А., Чулкин С. Г., Ереско С. П., Терсков Д. Ю.</b> Эффективность применения компенсаторов для фланцевых соединений трубопроводов .....	637
<b>Стручков А. В., Ереско С. П., Ереско Т. Т., Терсков Д. Ю.</b> Определение динамических характеристик элементов трансмиссии трёхосной лесотранспортной машины .....	640

## Секция

## «НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»

<b>Бондарев М. А., Рауцкий М. В., Тарасов А. С., Яковлев И. А.</b> Синтез и характеристика эпитаксиальных тонких пленок $Mn_5Ge_3$ на подложке кремния .....	644
<b>Воронин С. В., Терентьева Е. В., Левин И. И.</b> Исследование поверхности цветных металлов после выдержки в вакууме методом силовой зондовой микроскопии .....	646
<b>Гребенников Е. В., Воронина С. Ю., Симунин М. М., Семенуха О. В.</b> Роль метода введения углеродных нанотрубок на коэффициент тензорезистивности .....	648
<b>Карпов Е. С.</b> Проведение эксперимента по продольному сжатию тонкого упругого стержня .....	651
<b>Купряшов А. В., Пронин А. В., Шестаков И. Я.</b> Наноразмерные порошки в составе многофункциональных покрытий ракетно-космической техники .....	654
<b>Куценко В. С.</b> Отработка методики измерения вольт-амперной характеристики фотоэлектрических преобразователей для летного эксперимента .....	657
<b>Овчинников Ал. В., Телегин С. В., Типцова А. А.</b> Исследование радиационной обстановки на полярной орбите .....	660
<b>Ситников М. Н., Харьков А. М., Черемных Н. А., Никитинский О. С., Слепенко А. И.</b> Импеданс и индуктивность в твёрдых растворах $Ho_xMn_{1-x}S$ .....	663
<b>Соболев И. А., Рауцкий М. В., Яковлев И. А., Варнаков С. Н., Тарасов А. С.</b> Аномальный эффект Холла в эпитаксиальных тонких пленках $Mn_5Ge_3$ выращенных на подложках Si(111) .....	666
<b>Харьков А. М., Ситников М. Н., Гельгорн А. В., Рунов Р. В.</b> Электрическая поляризация в $Lu_xMn_{1-x}S$ .....	669
<b>Ходыкина А. А., Корчевская О. В.</b> Состояние и перспективы развития нанотехнологий в России .....	672
<b>Шалаев П. О., Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Фадеев Т. В., Жереб В. П., Эренчин К. М.</b> Исследование процессов структурообразования при сварке взрывом меди и молибдена .....	675

Секция  
**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
 (ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА, ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ  
 И ПЛАСТИЧНОСТИ, РЕОЛОГИЯ)»**

<b>Вяткин А. В., Мальцев А. Д.</b> Решение уравнения неразрывности консервативным полулагранжевым методом на двух сетках с разными шагами по времени .....	679
<b>Зув Д. М., Макаров Д. Д., Охоткин К. Г.</b> Модифицированные линейные формулы: геометрически-нелинейный изгиб консоли комбинированной нагрузкой .....	681
<b>Кравчуновский А. П.</b> Способ задания функции демпфирования в моделях космических аппаратов .....	684
<b>Мамонтов А. А.</b> Обработка меди давлением .....	687
<b>Мацулев А. Н., Симонов К. В., Рублева Т. В.</b> Анализ и интерпретация данных гравиметрических космических систем Grace и Grace-fo .....	690
<b>Сабиров Р. А., Фисенко Е. Н.</b> К расчету жесткости ортотропной предварительно растянутой пластины при воздействии температуры .....	693
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Использование законов сохранения для решения задачи коши для уравнений упругости .....	696
<b>Трифанов В. И., Жереб В. П., Бундин М. П., Трифанов И. В.</b> Влияние холодной пластической деформации на микроструктуру образцов суперинвара 32НҚД .....	699

Секция  
**«ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

<b>Агеев Я. И., Нижибовская Д. К., Косицына А. С., Бобров П. С.</b> Конденсация 4-гидразинилхиназолина с этиловым эфиром 2-гидроксимино-3-оксобутановой кислоты .....	703
<b>Агеев Я. И., Нижибовская Д. К., Бобров П. С.</b> Циклоконденсация 4-гидразинилхиназолина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом .....	706
<b>Антишин Д. В., Василишин Д. В., Красикова Т. В., Губин Д. Д.</b> Рогоз широколистный как альтернативный источник целлюлозы .....	709
<b>Антишин Д. В., Губин Д. Д., Красикова Т. В., Василишин Д. В.</b> Исследование зависимости свойств эмульсионного взрывчатого вещества в процессе хранения эмульгатора .....	711
<b>Антишин Д. В., Красикова Т. В., Василишин Д. В., Губин Д. Д.</b> Экстрактивные вещества рогоза широколистного <i>Typha Latifolia</i> .....	713
<b>Голенко Э. И., Боброва А. В., Роот Е. В.</b> Синтез этил-2-(3,5-диметил-4-нитрозо-1h-пиразол-1-ил)ацетата .....	715
<b>Кашапова Н. Р., Жирнова Е. А.</b> Методика выполнения измерений объема и массы нефтепродуктов в автомобильных цистернах .....	717
<b>Кулиева Э. Ш., Поздеева А. Н., Боброва А. В., Роот Е. В.</b> Синтез n-бензил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола .....	720
<b>Кучина К. Ю., Полиенко Т. В., Субоч Г. А.</b> N-алкилирование 3,5-диметил-4-нитрозо-1h-пиразола n-нитробензилбромидом .....	723
<b>Левченко С. И., Пен В. Р., Чижов Ю. В., Маскадынов Л. Е.</b> Оценка примесей в мономерах, используемых при получении стоматологических изделий, методом ЯМР .....	726
<b>Нижибовская Д. К., Агеев Я. И., Бобров П. С., Субоч Г. А.</b> Циклоконденсация 2-гидразинилпиримидина с 2-гидроксимино-1,3-дифенилпропан-1,3-дионом .....	729
<b>Пен В. Р., Левченко С. И.</b> Электрохимическая генерация агентов делигнификации древесины .....	732
<b>Пехотин К. В., Голубцова О. А., Круглякова Л. А.</b> Термораспад 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана в присутствии селената и тетрабората аммония .....	734
<b>Поздеева А. Н., Кулиева Э. Ш., Боброва А. В., Роот Е. В.</b> Доказательство строения N-пропил-3,5-дифенил-4-нитрозопиразола с помощью ЯМР Н спектроскопии .....	737
<b>Полежаева Н. И., В Вольф. А.</b> Термоокислительная деструкция флюса, дифталата бетулинола .....	739
<b>Полежаева Н. И., Ламберг Е. Р.</b> Термическая деструкция флюса, дифталата бетулинола .....	742
<b>Полежаева Н. И., Логачев Н. И.</b> Флюс, дифталат бетулинола, для паяльных паст .....	745
<b>Полиенко Т. В., Кучина К. Ю., Косицына А. С.</b> Получение 1,4-бис((3,5-диметил-4-нитрозо-1h-пиразол-1-ил)метил)бензола .....	748
<b>Пушница А. С., Власов В. В., Черепанов А. Н.</b> Влияние вулканизирующей группы на прочностные свойства эластомерных материалов при многократных деформациях в условиях низких температур .....	751

<b>Романченко А. С., Кукушкин А. А.</b> Синтез медного хелата пиридилсодержащего 1,3 дикетона .....	754
<b>Романченко А. С., Волкова Д. С., Кукушкин А. А.</b> Изучение кислотных свойств 3(5)-(нафталин-2-ил)-4-нитрозо-5(3)-(трифторметил)-1н-пиразола .....	756
<b>Чижов Ю. В., Пен В. Р., Левченко С. И., Маскадынов Л. Е.</b> Динамика массопереноса остаточных мономеров из объема полиметилметакрилата в водно-спиртовой раствор .....	759

## Секция

## «ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

<b>Бельская Е. Н., Тасейко О. В.</b> Параметризация процессов рассеяния NO <sub>2</sub> .....	763
<b>Ефремова И. С., Постникова У. С., Саулова Т. А., Тасейко О. В.</b> Повышение эффективности очистки воздуха производственных помещений .....	766
<b>Желтухина Ю. А., Кускашов П. Н., Бельская Е. Н.</b> Анализ видов воздействия и способов защиты от ионизирующих излучений на примере атомного предприятия ФГУП «ГХК» .....	769
<b>Калекулин В. Б., Гудаева Е. А.</b> Состояние и качество реки Кача Красноярского края .....	772
<b>Котов А. В., Тасейко О. В.</b> Вертикальное распределение загрязнения в городской застройке .....	776
<b>Макар Н. В., Соболева С. В., Воронин В. М.</b> Исследование загрязнения почвенного покрова при добыче и транспортировке товарной нефти .....	778
<b>Мачернис А. В., Крылова О. К., Кошечкина В. В.</b> Оценка вероятности возникновения лесного пожара в учебно-опытном лесхозе СибГУ им. М. Ф. Решетнева .....	781
<b>Саулова Т. А.</b> Бионические показатели растений урбанизированного ландшафта .....	784
<b>Саулова Т. А., Зайцева И. А.</b> Анализ методик оценки профессиональных рисков .....	787
<b>Тимошева А. Ю., Бельская Е. Н.</b> Внедрение роя беспилотных летательных аппаратов в технологии спутникового мониторинга лесных пожаров .....	790
<b>Ткачёва А. Е., Потапова В. О., Щербина А. С., Щербина Е. В., Жирнова Е. А.</b> Метрологическое обеспечение в области безопасности труда .....	793
<b>Черкасова Н. Г., Черкасов Л. Е.</b> Исследование возможности применения отработанного авиационного топлива в качестве вторичного ресурса .....	796

## Секция

## «КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО СЫРЬЯ»

<b>Арканова М. Е., Демиденко Н. Ю., Тарнопольская В. В., Еременко О. Н.</b> Перспективы использования костры технической конопли .....	800
<b>Войнов Н. А., Фролов А. С., Богаткова А. В., Чернов В. А.</b> Способ создания межфазной поверхности в аппарате с мешалкой .....	803
<b>Зырянов Д. Е., Решетова Н. С., Петрова А. А., Алашкевич Ю. Д.</b> Влияние профиля сборной гарнитуры дисковой мельницы на размол хвойной целлюлозы .....	806
<b>Имамов А. А., Лучкин М. А., Прикатов И. И., Амбросович Ю. А., Марченко Р. А.</b> Фаутная древесина для химической переработки .....	809
<b>Исаева Е. В., Мамаева О. О., Барина Н. С.</b> Влияние экстрактов из листьев тополя на показатели роста заплесневелых семян пшеницы .....	811
<b>Каплёв Е. В., Патраков В. А., Юртаева Л. В.</b> Анализ способов получения фильтровальной бумаги .....	814
<b>Карелина А. А., Алашкевич Ю. Д.</b> Зависимость степени помола от времени при размолке однолетних растений .....	817
<b>Каретникова Н. В.</b> Пероксидная целлюлоза из конопли .....	820
<b>Колосова Е. Р., Васильева Д. Ю., Юртаева Л. В.</b> Факторы, влияющие на механическую прочность бумаги .....	823
<b>Лопатин А. Ю., Тюменцева А. Е., Эскин В. Д., Криворотова А. И.</b> Композиционные материалы из отходов древесного сырья .....	826
<b>Петрова А. А., Воронин И. А., Алашкевич Ю. Д., Зырянов Д. Е.</b> Зависимость физико-механических показателей бумаги от вида ножевой поверхности гарнитуры .....	828
<b>Попова М. М., Слизикова Е. А., Токоякова Н. Н., Марченко Р. А., Шуркина В. И.</b> Основные достоинства и недостатки использования макулатуры .....	831
<b>Рогова Е. А., Алашкевич Ю. Д., Кожухов В. А., Лапин И. Р.</b> Способы получения бактериальной целлюлозы .....	834

---

<b>Романова М. Н., Шимова Ю. С., Лис Е. В.</b> Использование альтернативных лесных ресурсов для сохранения ценных сибирских пород деревьев .....	837
<b>Слизикова Е. А., Шуркина В. И., Марченко Р. А.</b> Эковата как экологичный материал из вторичного сырья .....	840
<b>Тарнопольская В. В., Кох Ж. А., Еременко О. Н., Ягудина Г. З.</b> Оценка перспектив использования нетрадиционного растительного сырья для производства функциональных напитков .....	843
<b>Тюменцева А. Е., Лопатин А. Ю., Эскин В. Д., Криворотова А. И.</b> Древесные композиты на основе модифицированной коры древесины .....	845
<b>Ушаков А. В., Алашкевич Ю. Д., Карелина А. А., Решетова Н. С.</b> Влияние концентрации волокнистой массы при ее размоле на среднюю длину волокна .....	847
<b>Федоров В. С., Рязанова Т. В., Мамаева О. О.</b> Биоконверсия как способ утилизации древесных отходов сосны обыкновенной <i>Pinus Sylvestris</i> .....	850
<b>Худов Д. А., Шотов А. А., Чистова Н. Г., Матыгулина В. Н.</b> Использование минеральных добавок при производстве древесноволокнистых плит сухим способом .....	853
<b>Черников П. В., Тримасова О. В., Кожухова Н. Ю.</b> Анализ конструкций вращающихся печей для получения прокаленного нефтяного кокса .....	856
<b>Ягудина Г. З., Садаева А. С., Тарнопольская В. В.</b> Древесные отходы хвойных пород как субстрат для биоконверсии .....	859

## CONTENTS

### *Section*

#### “PROJECTING AND PRODUCTION OF AIRCRAFT, SPACE RESEARCH WORKS AND PROJECTS”

<b>Anufrienko V. E., Volkov M. V., Nadein I. O., Filippov A. A.</b> A method for preparing the surface of metal fittings for gluing with tubes made of composite material .....	6
<b>Barsuk V. E., Smirnov D. N., Chemezov V. L., Shayfer S. V.</b> Computational and experimental studies of aviation and space technology in SibNIA im. S. A. Chaplygin .....	9
<b>Bordachev V. A., Rozhkova E. A., Kolga V. V.</b> Prevention of cavitation in the intake device .....	12
<b>Bordachev V. A., Rozhkova E. A., Kolga V. V.</b> Method for determining the position of the pressure center of a model rocket .....	15
<b>Vinogradova E. A., Demina A. Y.</b> Development of small experimental model rocket “Velox” as a practice-oriented method of students education .....	18
<b>Geraskina M. E., Kazakova T. Y., Nepomnyashchii Y. G., Tsytirkin N. G., Titarenko S. A.</b> Methods of cutting the curved surface of the reflector manufactured by RTM-technology .....	20
<b>Kozlov V. S., Kotelnikova S. V.</b> Nozzle thrust measurement device .....	24
<b>Kolmakov A. V., Vnukov A. A.</b> Application of tethered space system to service satellite .....	27
<b>Kolovsky I. K., Shmakov D. N.</b> Analysis of the orbital change manoeuvres satellite when constructing a global satellite system in a low circular orbit .....	30
<b>Mayorov V. V., Chepel G. A., A. Demina Yu.</b> Design of stabilization system of angular velocity along the roll channel of a student experimental rocket .....	32
<b>Marchuk M. E., Lykum A. I., Nadein I. O., Kustov K. S.</b> Design of the mounting bracket of the optical unit of the space vehicle using the method of topological optimization .....	36
<b>Petrushkin A. A., Kremzukov U. A.</b> Development of a simulation model for checking the charging time of a lithium-ion battery for the specified load cyclograms of a small space vehicle .....	39
<b>Pokhabov A. Yu., Ikonnikova A. A.</b> Method for manufacturing honeycomb filler by glue-free method for producing three-layer structures .....	43
<b>Prokhorov V. V.</b> Air transport means of new opportunities .....	46
<b>Rozhkova E. A., Bordachev V. A., Draganyuk M. N.</b> Study of emergency situations in the history of the domestic rocket and space industry .....	49
<b>Rudenko M. S., Girn A. V., Mikheev A. E.</b> Influence of laser processing of titanium alloys on the strength of adhesive joint with cfrp .....	52
<b>Savelyev D. O., Mikheev A. E., Girn A. V., Ravodina D. V.</b> The effect of the product shape during microarc oxidation on the mass characteristics of the coating .....	56
<b>Smirnov P. N.</b> Tangent stiffness of the coil tension – compression spring .....	59
<b>Sokolova A. O., Mayorov V. V., Fadeenkov P. V.</b> Application of composite materials in experimental rocket engineering for design optimization .....	62
<b>Favorskiy V. S.</b> Study of aerodynamic characteristics of the model of a promising aircraft on the aerodynamic complex ULAC-1 .....	65
<b>Favorskiy V. S.</b> Identification of the area of ambiguity of the structure of the extended interaction of counter unequal supersonic jets .....	67
<b>Shamlitskiy A. Ya.</b> Promising technologies for the use of composite materials in RCT .....	70
<b>Shatnykh K. P., Elirazieva M. G., Kovalenko G. D.</b> Analysis of UAV application for agricultural processing .....	73
<b>Shatov A. V., Pikulin S. A.</b> The effect of the deviation of the thickness of the composite material layers on the properties of the laminate .....	76

### *Section*

#### “LARGE TRANSFORMABLE CONSTRUCTIONS OF SPACECRAFT”

<b>Bardaev P. P., Burnysheva T. V., Danilov M. N.</b> Tensometric measuring system for control of forces in moving elements of large transformable space structures .....	80
<b>Belov O. A., Beloglazov A. P., A. G. Eremin A. G., Verstakov A. V.</b> Creation of large-sized farms deployed in space from transformable carbon fiber elements .....	84
<b>Berns V. A., Godin A. I., Zhukov E. P., Krasnorutskiy D. A., Lakiza P. A., Lysenko E. A., Para A. V., Shkoda A. V.</b> Finite element model updating of aircraft .....	87

<b>Berns V. A., Godin A. I., Zhukov E. P., Krasnorutskiy D. A., Lakiza P. A., Marinin D. A., Para A. V., Shkoda A. V.</b> Application of operational modal analysis in estimation of modal parameters for aerospace vehicles .....	90
<b>Dvirniy G. V., Dvirniy V. V., Shevchuk A. A., Yelfimova M. V., Snezhko A. A.</b> A method for protecting technical objects in conditions of northern latitudes from soil subsidence based on thermosyphons .....	93
<b>Zadorin A., Voronina S. Yu., Semenuha O. V., Simunin M. M.</b> Modification of the test bench module for investigation of the electrical resistance of polymer composite materials .....	96
<b>Zimin V. N., Krylov A. V., Filippov V. S., Shakhverdov A. O.</b> On the issue of creating an actuator from a material with a shape memory effect for transformable space structures .....	99
<b>Igolkin A. A., Filipov A. G.</b> Calculation and experimental method for testing the dynamic strength of a small spacecraft structure .....	102
<b>Kovalchuk L. M., Burnysheva T. V., Shaidurov S. V.</b> 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 .....	104
<b>Ladygin A. P., Porpilev V. G., Nadezhin M. I., Yudina Z. A., Shirobokov O. V.</b> Spacecraft electric pump testing results with artificial intelligence methods in tasks of diagnostics .....	107
<b>Litvintseva A. A., Cheverda V. V., Vozhakov I. S.</b> Experimental investigation of flow regimes in a pulsating heat pipe .....	110
<b>Likhachev A. N.</b> Theoretical foundations of research and development of flexible composite structures with controlled physical and mechanical characteristic .....	112
<b>Marchenko E. S., Kovaleva M. A., Baigonakova G. A., Ponomarev S. V.</b> Prospects for the application of shape memory materials from titanium nickelide in the aerospace field .....	115
<b>Moiseev P. P., Victorov A. I., Babankov D. A.</b> Controlled mechanical braking device for spacecraft solar panels deployment .....	118
<b>Moiseev P. P., Viktorov A. I., Smirnov V. A., Nechushkin I. I.</b> Compression tear-off electrical connectors for spacecraft separable structures .....	120
<b>Ovchar A. V.</b> Breakthrough motion without propellant: physical principles of thrust generation in an engine based on a K-resonator using an adapter/interface to additional dimensions of the universe .....	122
<b>Ovchar A. V.</b> Breakthrough motion without propellant: abnormal thrust in a V-resonator based engine .....	125
<b>Pavelko S. V., Silivanov R. P., Zamyatin D. A., Gribkov I. S., Ulybushev E. A.</b> Development of a solar battery drive for small spacecraft .....	127
<b>Pikulin S. A.</b> A program for calculating the rational reinforcement scheme of a composite pipe .....	131
<b>Pokudin S. V., Babushkina D. V.</b> Development of an electric drive for the orientation system of a solar panel of a space vehicle .....	134
<b>Pokhabov Yu. P.</b> On the reliability of transformable structures .....	137
<b>Semenukha O. V., Bril I. I., Voronina S. Yu.</b> Increase of adhesive power at the fiber-matrix interface of polymer composite material .....	139
<b>Seryakov A. V., Alekseev Andr. P.</b> Numerical studies of the heat pipe's evaporators operation .....	142
<b>Sypachev V. R., Zykov A. S.</b> Investigation of the stability of the air gap of a space vehicle's hull-less hybrid stepper motor .....	146
<b>Tonshina A. V., Shalygina T. A.</b> Hinge assembly using elastic plate .....	148
<b>Shevchuk A. A., Butov V. G., Dvirniy V. V., Pastushenko O. V., Rud'ko A. A.</b> Thermal stabilization of the solar simulator light source In a thermal vacuum chamber using loop heat pipes .....	150
<b>Shendalev D. O., Pikulin S. A.</b> Algorithm for selecting the reinforcement scheme of the boom of a large-sized transformable reflector .....	153

Section

“PROJECTING, PRODUCTION AND TESTING OF AEROSPACE ENGINES”

<b>Goryachkin E. S., Kudryashov I. A., Shcherban A. I., Novikova U. D.</b> Analysis of the effect of the air bleed valve on the performance of the axial compressor .....	158
<b>Davydik V. A., Oreshkin D. I., Rabetskaya O. I.</b> Development of a method for calculating a hydrodynamic sliding bearing .....	161
<b>Danilov N. A., Arngold A. A., Zuev A. A., Gogolev V. O.</b> To the method of experimental study of heat transfer in spatial channels .....	164
<b>Danilov N. A., Zuev A. A., Gogolev V. O., Fedchenko T. A.</b> Airflow at a ninety-degree turn .....	167
<b>Zharikov K. I., Dron'M. M.</b> Determination of project parameters of a rocket propulsion with electoreactive thrust .....	169

<b>Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A., Fesenko I. A., Nazarov V. P.</b> Analysis of the mechanical characteristics of the material of the body of a low-thrust rocket engine demonstrator camera made by 3D printing .....	172
<b>Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A., Shestov N. S., Dergach I. V.</b> Metallographic analysis of a camera made by 3D printing .....	175
<b>Zubakov V. M., Kharitonova A. A.</b> The research of the influence of bypass valves on the characteristics of axial compressor .....	178
<b>Kashirtsev V. V., Butrim V. N., Silis M. I., Trushnikova A. S., Berg A. A.</b> Investigation of the effect of the chromium-nickel alloy structure on the electrical resistance of the capillary tube .....	181
<b>Kudryashov I. A., Goryachkin E. S., Tyurina D. S.</b> The study of the influence of the casing treatment slots on the compressor stage characteristics .....	183
<b>Manokhina E. S., Shinkarev M. A., Rubailo A. P., Fomenko A. A., Gordeev V. V.</b> Analysis of the results of x-ray studies of rct products manufactured by SLM printing .....	186
<b>Melnikov S. A., Zubakov V. M., Kharitonova A. A.</b> Design of regenerative cooling of a rocketing engine chamber taking into account thermal and strength conditions .....	188
<b>Nazarov V. P., Piunov V. Yu., Golikovskaya K. F., Nazarova L. P.</b> Simulation modeling of bench test conditions of liquid rocket engines of low-thrust .....	191
<b>Novikova Yu. D., Melnikov S. A., Docenko A. Yu.</b> Influence of the air bleeding on the gas-dynamic characteristics of the axial compressor .....	193
<b>Rutkovskaya M. A., Rutkovskiy V. O., Nasibullin O. I.</b> Uav engine altitude correction .....	196
<b>Rutkovskiy V. O., Nasibullin O. I., Rutkovskaya M. A.</b> Throttle body with two integrated nozzles .....	198
<b>Fesenko I. A., Dergach I. V., Brivkalin P. A., Kazakov R. A., Nazarov V. P.</b> Post-processing of the camera-demonstrator of a low-thrust rocket engine made using SLM-printing technology .....	201
<b>Fesenko I. A., Dergach I. V., Zhigurova E. E., Mumber K. E., Nazarov V. P.</b> Development of a technological process for testing the demonstration chamber of a small thrust engine for strength and tightness .....	203
<b>Fomenko A. A., Gordeev V. V., Brivkalin P. A., Shestov N. S., Manokhina E. S.</b> Manufacturing of a rocket engine chamber by the method of additive technologies .....	205
<b>Kharitonova A. A., Shcherban A. I., Zubakov V. M.</b> The influence of the output geometry configuration of a low-sized axial turbine on its performance .....	208
<b>Chernenko V. V., Chernenko D. V.</b> Study of the flowing part of a centrifugal pump using the power balance .....	211
<b>Sheludko M. L., Nazarov V. P., Zenyuk K. O., Nazarova L. P.</b> Checking and modeling of the parameters of the operation process in the gas generators of the pressurization of the fuel tanks of the lre .....	214
<b>Shestov N. S., Brivkalin P. A., Fomenko A. A., Talai E. P., Gordeev V. V.</b> On the peculiarities of designing the chamber of a small thrust rocket engine with the use of additive technologies .....	217
<b>Shikarev M. A., Manokhina E. S.</b> Features of the methodology for calculating the energy-mass characteristics of electric pump units of liquid rocket engines .....	219

*Section*

**“HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES IN AIRCRAFT, POWER STATIONS  
AND LIFE SUPPORT SYSTEMS”**

<b>Belyavskii A. E., Borshev N. O.</b> Optimization of the design parameters of the radiation heat exchanger of the system for ensuring the thermal regime of the lunar base under conditions of parametric uncertainty .....	223
<b>Borshchev N. O., Belyavsky A. E.</b> Inverse problems in the design of the thermal regime of thermal insulation materials .....	225
<b>Bulov A. O.</b> Using a recuperative heat exchanger to increase cooling capacity .....	228
<b>Bulov A. O.</b> Turbulization as a way to intensify the heat exchange process .....	231
<b>Vasil'ev E. N., Emel'yanov D. P., Nesterov D. A.</b> Effect of frost formation on characteristics of heat exchanger .....	234
<b>Vasil'ev E. N., Emel'yanov D. P.</b> Peculiarities of water draining from an inclined slot channel during frost melting .....	237
<b>Delkov A. V., Tanasiyenko F. V.</b> A one-dimensional model of complex heat transfer in a spacecraft thermal control system .....	240
<b>Delkov A. V., Shevchenko Yu. N., Shageeva A. A.</b> Differential model of friction losses in the impeller of a centripetal turbine stage .....	243

<b>Enkov M. O., Gorbenko T. I., Gorbenko M. V.</b> Fuel based on thermite systems for small thrust engines .....	246
<b>Kapuschak K. I., Keller A. I.</b> Emergency smoke removal system: purpose, design, principle of operation .....	249
<b>Kapushchak K. I., Keller A. I.</b> Features and advantages of duct type air conditioning systems .....	252
<b>Kruglenya A. I., Detkina A. P.</b> The use of thermoelectric converters in automated systems .....	255
<b>Chernenko V. V., Chernenko D. V.</b> To the calculation of the energy characteristics of centrifugal pumps grats .....	257
<b>Chernenko V. V., Chernenko D. V.</b> Method for integration of momentum equations when flow reversal .....	260
<b>Shevchenko Yu. N., Keller A. I., Kapushchak K. I., Shageeva A. A.</b> Mathematical model of differential friction losses in a microturbine guide with thermal return by enthalpy .....	263
<b>Shilkin O. V., Kishkin A. A.</b> Heat transfer of a two-phase flow in thermal control systems of space vehicles .....	266
<b>Shcherbina O. V.</b> Remote recording of ultrasonic signals generated by pulsed beams of charged particles .....	269

Section

“TECHNOLOGY IN ROCKET PRODUCTION”

<b>Vehov A. S., Nekrasova T. L., Titarenko S. A.</b> Method of mechanical processing of carbon fiber pipes .....	273
<b>Vlasenko A. V., Kosyreva A. I.</b> Practical applications of nanoporous films .....	276
<b>Votyakov K. A., Nadezhin M. N., Karabonceva M. V., Karabonceva N. V., Matsur G. A.</b> Control of the geometric characteristics of spherical parts using coordinate measuring machines .....	279
<b>Denisov V. V., Denisova Yu. A., Koval N. N., Kovalsky S. S., Leonov A. A., Ignatov D. Yu., Ostroverkhov E. V., Teresov A. D., Tishchenko V. N., Savchuk M. V., Yakovlev V. V.</b> Increasing the wear resistance of the surface of materials and products by combined methods of beam-plasma engineering .....	282
<b>Leonov A. A., Denisova Yu. A., Denisov V. V., Tishchenko V. N., Savchuk M. V.</b> Control of the phase composition of nitridated alloy steels .....	285
<b>Luzanov O. R., Snezhko A. A.</b> Technological features of layer-by-layer synthesis of metal parts .....	288
<b>Luzanov O. R., Snezhko A. A.</b> The influence of the chemical composition of parts on the technological capabilities of layer-by-layer synthesis by arc surfacing .....	292
<b>Nadezhin M. N., Harina A. A., Karabonceva M. V., Karabonceva N. V., Matsur G. A.</b> Control of angular and linear movements of machine moving parts using laser tracker .....	296
<b>Ostapenko D. V., Tolstopyatov M. I.</b> Comparative analysis of the methods of thermodynamic calculation of liquid rocket engines .....	298
<b>Pervova I. N.</b> Technological features of rotation extrusion of large-sized spherical rocket body elements from aluminum alloy AMG6 .....	301
<b>Ramenskiy V. V.</b> Sharpening of spherical burr .....	303
<b>Ryzhikov N. S.</b> Improvement of static and dynamic characteristics of rocket engines steering drive units .....	305
<b>Savchuk M. V., Denisov V. V., Denisova Yu. A., Leonov A. A., Skosyrsky A. B.</b> Properties of single-layer and multilayer coatings produced by the vacuum-arc plasma-assisted method .....	308
<b>Smirnov A. N., Dyukarev A. Yu.</b> Improving the performance of parts of movable interfaces by creating and modifying surface layers using combined technologies .....	311
<b>Syzganov V. S., Merzlyakov V. V.</b> Application additive technology for products from polymeric materials (ftoroplast) .....	314
<b>Titenko S. V., Zhuravlev V. Yu.</b> Using special units in a thin-walled pipe bending machine .....	316
<b>Torgashin A. S.</b> To the issue of approximation of test data .....	318
<b>Udod L. S., Mezentseva N. V.</b> Development of a method for joining polymeric composite materials .....	320
<b>Fedchenko T. A., Danilov N. A., Khalekov Y. A.</b> The use of additive technologies in domestic production .....	323
<b>Khalekov Y. A., Danilov N. A., Fedchenko T. A.</b> Additive technologies for the production of rocket and space technology in foreign production .....	325
<b>Chuvatov A. P.</b> Methods of repair the pins of a multi-pin electrical plug .....	327
<b>Shvaleva N. A., Fadeev A. A.</b> The accuracy of electrochemical shaping of cavities of thin-walled parts by a profile .....	329

## Section

“CONTROL SYSTEMS, SPACE NAVIGATION  
AND COMMUNICATION SYSTEMS”

<b>Abramchik D. D., Shpiger N. V., Gaipov K. E.</b> A mathematical model for finding the optimal distribution of information flows with a minimum amount of bandwidth .....	333
<b>Golubev E. N.</b> Recofiguration of ISS satellite computer network .....	336
<b>Grin I. V., Morozov O. A., Pinegina N. A.</b> Time delays congruencecriterion in the problem of multiple radio emission sources navigation parameters estimation .....	340
<b>Zhukov A. O.</b> Basic errors of navigation along the bodies of the solar system .....	343
<b>Kartsan I. N.</b> Beacon systems or navigation satellite systems .....	346
<b>Krekov S. D., Boev N. M., Izotov A. V.</b> Link budget calculation method for near-field magnetic communication systems .....	349
<b>Negodeeva I. A., Boev N. M.</b> Parameters calculation of an induction magnetometer .....	352
<b>Fedorov M. S., Shirokov A. D., Feoktistov D. A., Smirnov A. V.</b> Sensor networks based on the Attiny13 microcontroller .....	355
<b>Shatrov A. K., Fisenko E. N., Rabetskaya O. I.</b> Testing of the thermal regime of communication satellites .....	357

## Section

## “SPACE AND SPECIAL-PURPOSE ELECTRONIC INSTRUMENT ENGINEERING”

<b>Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V.</b> Development of software and hardware simulators of SpaceWire traffic for testing the onboard equipment of spacecraft .....	361
<b>Sevostyanov N. A., Gorbunov R. L.</b> Double voltage control in a spacecraft power system with a digital control system .....	364
<b>Shakhmatov A. V., Khanov V. Kh.</b> Construction of onboard avionics of a nanosatellite Reshucube-1 .....	367

## Section

## “ELECTRONIC COMPONENT BASE OF SPACE SYSTEMS”

<b>Golovanov S. M., Orlov V. I., Fedosov V. V.</b> Using of the concept of the second type homogeneity in electronic component testing for space application .....	370
<b>Lozhnikov A.</b> Oven-controlled crystal oscillators for the responsible applications .....	374
<b>Luzhaitsev D. A., Turov A. O., Hohol D. S., Miller Y. A., Luzhaitseva E. O.</b> Power amplifier monolithic microwave integrated circuit 0,25 um GaN HEMT .....	376
<b>Nikitina L. N., Trifanov V. I., Belman A. V., Trifanov I. V.</b> Plasma ion energy recuperators .....	379
<b>Noskov F. M., Kveglis L. I., Yeshtokina A. I.</b> Investigation of phase formation processes in Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO ceramics obtained by the SPS method .....	381
<b>Savel'ev Yu. N.</b> Features of the production of semiconductor devices and integrated circuits in polymer cases .....	384
<b>Trifonov V. I., Novoselskaya E. K., Trifonov I. V.</b> Conversion of microwave energy into direct electric current .....	387
<b>Khamidullina N. M., Zefirov I. V., Chernikov P. S.</b> Parameters of single event effects created by ionizing radiation of space and radioisotope units of the interplanetary SC .....	389
<b>Chernikov P. S., Khamidullina N. M., Zefirov I. V.</b> Parameters of single event effects created by space ionizing radiation during flight of the interplanetary SC .....	392

## Section

## “CONTROL AND TESTING OF AEROSPACE EQUIPMENT”

<b>Azin A. V., Ponomarev S. V., Ponomarev S. A., Maritsky N. N., Suntsov S. B.</b> Method for non-destructive testing of spacecraft radio-electronic equipment .....	396
<b>Gorodilov A., Semyonov E.</b> The use of nonlinear properties of crimp joints in quality control cable products of space. ....	399
<b>Goryainova A. A., Mironovich Y. V.</b> Vacuum pumping systems .....	402

<b>Kovkin I. V., Moskalenko N. V., Kremzukov Ju. A.</b> Automated insulation control in spacecraft power supply systems .....	405
<b>Feoktistov D. A., Oreshenko G., Baranova E. G., Fedorov M. S., Shirokov A. D.</b> Features of servos verification .....	408
<b>Tsivilev I. N., Shangina E. A.</b> The model of risk management during thermal vacuum tests at spacecraft level .....	410
<b>Shevchuk A. A., Dvirniy V. V., Maybakh M. S., San'ko S. A., Pavlova A. A.</b> Designing of the led assembly for out-atmospheric solar simulator .....	412

*Section*

**“SMALL SPACECRAFT: PRODUCTION, EXPLOITATION AND CONTROL”**

<b>Belehov S. S., Agafonova O. E., Popov M. E., Khanov V. K., Dorogaykina E. M.</b> Design of the small spacecraft “Cubesat”. Phase A .....	416
<b>Belov S. V., Belkov A. V., Zhukov A. P., Pavlov M. S., Ponomarev S. V.</b> Cubesat thermal state under different electronic circuit board packaging .....	419
<b>Zuev D. M., Khanov V. Kh.</b> Organization of flight experiments on-board of ReshUCube-1 satellite .....	422
<b>Kadadova A. V., Kadochnikov D. M., Utkin V. V., Goncharov V. O.</b> Cubesat nanosatellite payload development .....	425
<b>Kadochnikov D. M., Utkin V. V., Kadadova A. V., Goncharov V. O.</b> Composition of mission control center for small spacecraft in BSTU “Voenmeh” .....	428
<b>Kombaev T. S., Artimov M. E.</b> Cubesat form factor spacecraft project with experimental cryogenic module .....	431
<b>Kustov N. D., Evdokimov K. S.</b> Definition of the network protocol stack and technologies for space integrated networks .....	434
<b>Lapukhin E. G., Kalmykov A. P., Abros'kin V. V., Podobaylova V. A.</b> Automation rotators of antennas for communication with reshucube`s .....	437
<b>Lapukhin E. G., Chekmarev S. A., Shakhmatov A. V., Abros'kin V. V., Podobaylova V. A., Kalmykov A. P.</b> Features of made of VHF communication with Reshucube-1 at Reshetnev univercity .....	440
<b>Lukyanov M. M.</b> Evaluation of the possibility of active aerodynamic control of the formation of nanosatellites .....	443
<b>Malygin D. V.</b> Development of a monitoring system the flow of charged particles for analysis of the nanosatellite flight path .....	446
<b>Uchevatov V. I.</b> Research of thermal mode and setting experiments of Reshucube-1 spacecraft .....	449
<b>Khanov V. Kh., Zuev D. M., Shakhmatov A. V., Chekmarev S. A., Lepeshkina E. S.</b> Preliminary results of the Reshucube-1 space mission .....	452

*Section*

**“USAGE OF EARTH’S REMOTE-SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND MODELLING”**

<b>Babiy I. A., Goncharov A. E.</b> Georeferencing sonogram sonar starfish .....	456
<b>Babiy I. A.</b> Optimizing random forest model hyperparameters for biomass estimation algorithm training .....	458
<b>Bakhtina A. V.</b> Analysis of methods for testing the hypothesis of the independence of random variables .....	461
<b>Belyaev R. R.</b> Methods for early detection of smoke of natural fires based on visual data using neural networks .....	465
<b>Danilova I. V., Burenina T. A.</b> Using the Google Earth Engine to calculate evapotranspiration in the podkamenaya tunguska river basin .....	468
<b>Im S. T., Lee V. G.</b> Dynamics of vegetation indices and climate trends in Khakassia .....	470
<b>Im S. T.</b> Relation between dynamics of forest territories of Khakassia and relief .....	473
<b>Kadochnikov A. A.</b> Development of a data collection system for the tasks of analysis the state of atmospheric air .....	476
<b>Kotsova A. S.</b> Dynamics of water surfaces of the north-western part of the Taimyr peninsula since the end of the 20th century .....	479
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Modified nonparametric algorithm for automatic classification of large volume data .....	482
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Nonparametric methods for testing hypotheses about distributions of random variables .....	486

<b>Nikitin A. V.</b> Geoinformational analysis of the dynamics of dark coniferous forests of Khakassia in the 21st century .....	489
<b>Perevozchikova E. E., Sokolov E. P., Okhotkina E. A.</b> Development of a tourist MAP-scheme using GIS technologies .....	491

## Section

## “EXPLOITATION AND RELIABILITY OF AIRCRAFT”

<b>Andreev M. A., Shelopugin S. D., Chirkov P. R.</b> The influence of the geometry of the wing profile of the ekranoplane on its properties .....	495
<b>Afanaseva A. V., Siakov E. E., Siakov V. E.</b> Modernization of the water system of the Embraer e-170 .....	499
<b>Afanaseva A. V., Siakov E. E., Siakov V. E.</b> Analysis of the activities of the aviation company “S7 Airlines” in modern conditions .....	502
<b>Idiyatulin D. A., Trishin S. S., Boyko O. G., Achkasova E. A.</b> Analysis of failures and malfunctions of the aircraft power plant MIG-31BM according to the statistics of the fighter aviation regiment .....	505
<b>Ikonnikov E. A., Kovalistov A. S., Sochnev N. N., Roslik S. I., Shakal A. N.</b> Investigation of the I15/200v secondary current system on An-24 An-26 An-30 aircraft .....	507
<b>Kovalistov A. S., Sochnev N. N., Roslik S. I., Shakal A. N., Akzigitov R. A.</b> Development of systems for flights in difficult weather conditions of light aviation .....	509
<b>Koptev A. N., Valiev S. E., Muminov A. A.</b> Improving the technological assessment of the quality and diagnostics of aircraft by introducing neural networks to solve the problem of monitoring and detecting failures of the power supply system of the aircraft B787 .....	512
<b>Krashennnikova O. V.</b> Operation of force and torque sensors in aviation technology .....	515
<b>Kunin I. S., Ananko D. G., Ananko I. D.</b> Refinement of G1000 avionics in CESSNA 208B aircraft for work in high latitudes .....	518
<b>Kovalenko G. D., Elizari M. G., Merkulov S. I.</b> Test complex of operational characteristics of cylindrical vortex propellers of uav .....	520
<b>Popov D. M., Timokhovich A. S.</b> Optimization of the ATR-42 autopilot troubleshooting process .....	523
<b>Sochnev N. N., Ikonnikov E. A., Roslik S. I., Shakal A. N., Kovalistov A. S.</b> Development of import substitution in the field of civil aviation .....	525
<b>Fedorov S. V., Solodkin A. V., Churbakov U. V., Plotnikov D. A., Boyko O. G.</b> To the question of the organization of the external line station of aircraft maintenance .....	528
<b>Tsapienko A. S.</b> Operation of aerospace time sensors .....	531
<b>Ergasheva M. Z., Chizhevskaya M. V.</b> International experience in the use of metals in the aircraft industry .....	534

## Section

## “TECHNOLOGY AND MECHATRONICS IN MACHINE BUILDING”

<b>Bolshakov R. S., Kargapoltsev S. K.</b> Features of vibrational movement of the working environment .....	538
<b>Verveiko D. S., Braverman V. Ya., Zlobin S. K., Gusev V. U., Oboronov V. V.</b> Quality of a welded joint of a blank of a flexible waveguide section of a space vehicle .....	541
<b>Gordeev Y. I., Binchurov A. S., Vakulin M. S., Usevich N. I., Kazakov I. S.</b> Influence of cutting conditions on surface roughness during high-speed milling of composite materials .....	543
<b>Gordeev Y. I., Binchurov A. S., Krivov D. A., Filippov S. V., Timoshev P. V.</b> Modernization of the design of the working bodies of the roller crusher .....	546
<b>Gorshkalev D. A., Isaev A. P., Amelchenko N. A.</b> Issues of using composite materials in the manufacture of rocket and space technology .....	549
<b>Gorshkalev D. A., Amelchenko N. A.</b> Features of obtaining diametrical dimensions when printing a model by the fused deposition modeling (FDM) .....	552
<b>Grishin A. A., Pavelko S. V., Sypacev V. R.</b> Wear of electroplated coating of conductive rings of current-collecting devices of spacecraft .....	555
<b>Danykin V. V., Kozyrev A. S.</b> A device for basing and fixing workpieces along the inner diameter .....	558
<b>Detkina A. P., Kruglenya A. I.</b> Rotary turning schemes .....	560
<b>Zhigareva A. A., Evstifeykin A. I., Ramenskaya E. V.</b> Evaluation of the quality parameters of the part surface layer after machining .....	563

<b>Ivanov P. A., Levko V. A.</b> Analysis of the roughness and microhardness of the inner surface of a brass rectangular workpiece before and after abrasive flow machining .....	566
<b>Isaev A. P., Gorshkalev D. A., Sorokovikov V. A., Osipova V. A., Zverintseva L. V.</b> Tool wear research at electric discharge machining .....	569
<b>Levko V. A., Teryaev N. S.</b> Technologies of finishing of closed channels of complex profile parts .....	572
<b>Litovka O. V., Levko V. A.</b> Review of the world experience in modeling contact interactions of the abrasive flow machining .....	578
<b>Markelov I. A.</b> Test device for deployable reflector's opening drive .....	581
<b>Panaskov A. O., Shumilina Y. E.</b> Investigation of the transitional function of the bionic propulsion unit .....	584
<b>Polyakovskaya A. V., Korsakova A. A., Kolesnikova A. A.</b> Composite materials in mechanical engineering .....	587
<b>Repin S. V., Orlov D. S.</b> Construction of elastic characteristics of a punch-free pneumo-hydraulic shock absorber in the suspension of a transport-technological machine .....	589
<b>Romanovskaya L. M.</b> The problem of import substitution in the field of microelectronics .....	592
<b>Sukhanova O. A., Mal'ko L. S.</b> Development of a mathematical model of the circular feed positioning process when cutting turns of globoid worms .....	595
<b>Sukhanova O. A., Mal'ko L. S., Karelina E. A.</b> A device for a gear milling machine for positioning a circular feed when cutting turns of globoid worms .....	597
<b>Sukhanova O. A., Novoselskaya E. K., Patraev E. V., Trifanov I. V.</b> Vibration anodic-abrasive polishing of machine parts by magneto controlled charged particles .....	600
<b>Shalaev P. O., Kveglis L. I., Noskov F. M., Zhereb V. P., Erenchin K. M.</b> Influence of shock-wave loading on the state of the Cu-Mo composite .....	603
<b>Shumilina Y. E., Panaskov A. O.</b> Adaptive gripper approach algorithm and determination of the distance to the object based on the streaming image .....	606
<b>Shcherbina E. V., Shcherbina A. S., Tkacheva A. E., Potapova V. O., Snezhko A. A.</b> Problems of quality control of welded joints of complex configuration parts and methods for their elimination .....	609
<b>Shcherbina A. S., Tkacheva A. E., Potapova V. O., Shcherbina E. V., Zhirnova E. A.</b> Selection of measuring instruments for the control of smooth gauges .....	612
<b>Yushkova (Belonogova) O. V., Bezrukikh A. I., Zhereb V. P., Stepanenko N. E., Saparova A. S.</b> Study of the modifying ability of aluminum alloys of the Al-Ti-Nb system .....	615

Section

“MECHANICS OF SPECIAL SYSTEMS”

<b>Arinchev S. V.</b> 2D-simulation of the gravity-free laser-cutting dynamic process applied to the large space-debris object .....	619
<b>Eresko V. S., Eresko S. P., Eresko T. T., Terskov D. YU.</b> Technological preparation for the production of seals for hydraulic drive elements .....	622
<b>Eresko S. P., Ivanov Yu. F., Klopotov A. A., Lopatin I. V., Lykov S. V.</b> Structure and properties of high-chromium steel subjected to nitriding in plasma of an independent arc discharge with an incandescent cathode .....	627
<b>Eresko A. S., Terskov D. Yu., Eresko S. P.</b> Modernization of the laboratory stand GPS-01 .....	630
<b>Polyakov N. A., Chulkin S. G., Eresko S. P., Terskov D. Y.</b> Influence of the value of permissible deviations of pipe dimensions on the quality and terms of installation of pipelines .....	634
<b>Polyakov N. A., Chulkin S. G., Eresko S. P., Terskov D. Y.</b> Efficiency of application of compensators for flanged pipeline joints .....	637
<b>Struchkov A. V., Eresko S. P., Eresko T. T.</b> Determination of dynamic characteristics of transmission elements of a three-axle timber transport machine .....	640

Section

“NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN AEROSPACE INDUSTRY”

<b>Bondarev M. A., Rautskii M. V., Tarasov A. S., Yakovlev I. A.</b> Synthesis and characterization of epitaxial Mn <sub>5</sub> Ge <sub>3</sub> thin films on a silicon substrate .....	644
<b>Voronin S. V., Terenteva E. B., Levin I. I.</b> Investigation of the surface of non-ferrous metals after exposure to vacuum by force probe microscopy .....	646
<b>Grebennikov E. V., Voronina S. Yu., Simunin M. M., Semenukha O. V.</b> The role of the CNT introduction method on the strain-resistance coefficient .....	648

<b>Karpov E. S.</b> Experiment on longitudinal compression of a thin elastic rod .....	651
<b>Kupriashov A. V., Pronin A. V., Shestakov I. Y.</b> Nanoscale powders as part of multifunctional coatings of rocket and space technology .....	654
<b>Kutsenko V. S.</b> Test procedure for measuring voltage-ampere characteristic of photovoltaic converters for flight experiment .....	657
<b>Ovchinnikov Al. V., Telegin S. V., Tiptsova A. A.</b> Investigation of the radiation situation in polar orbit .....	660
<b>Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Cheremnykh N. A., Nikitinskiy O. S.</b> Impedance and inductance in $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions .....	663
<b>Sobolev I. A., Rautskii M. V., Yakovlev I. A., Varnakov S. N., Tarasov A. S.</b> Anomalous Hall effect in epitaxial $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ thin films grown on Si(111) substrates .....	666
<b>Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Gelgorn A. V., Runov R. V.</b> Electrical polarization in $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ .....	669
<b>Khodykina A. A., Korchevskaya O. V.</b> State and prospects of nanotechnology development in Russia .....	672
<b>Shalaev P. O., Noskov F. M., Kveglis L. I., Fadeev T. V., Zhereb V. P., Erenchin K. M.</b> Research of processes of structural formation in explosion welding of copper and molybdenum .....	675

## Section

## “CONTINUUM MECHANICS (GASDYNAMICS, HYDRODYNAMICS, THEORY OF ELASTICITY AND THEORY OF PLASTICITY, REOLOGY)”

<b>Vyatkin A. V., Maltsev A. D.</b> Conservative semi-lagrangian method for continuity equation constructed on two grids with different time steps .....	679
<b>Zuev D. M., Makarov D. D., Okhotkin K. G.</b> Modified linear theory formulas: geometrically nonlinear bending of a cantilever with combined loading .....	681
<b>Kravchunovsky A. P.</b> Approach for defining the damping function in spacecraft models .....	684
<b>Mamontov A. A.</b> Pressure treatment of copper .....	687
<b>Matsulev A. N., Simonov K. V., Rubleva T. V.</b> Data analysis and interpretation gravimetric space systems Grace and Grace-fo .....	690
<b>Sabirov R. A., Fisenko E. N.</b> On the calculation of the rigidity of an orthotropic pre-stretched plate under the impact of temperature .....	693
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Using conservation laws to solve the Cauchy problem of equations of dynamic elasticity theory .....	696
<b>Trifanov V. I., Zhereb V. P., Bundin M. P., Trifanov I. V.</b> Influence of cold plastic deformation on the microstructure of samples of superinvar 32NKD .....	699

## Section

## “CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES”

<b>Ageev Y. I., Nizhibovskaya D. K., Bobrov P. S.</b> Cyclocondensation of 4-hydrazinoquinazoline with 2-hydroxyimino-1,3-diphenylpropane-1,3-dione .....	703
<b>Ageev Y. I., Nizhibovskaya D. K., Kositsyna A. S., Bobrov P. S.</b> Condensation of 4-hydrazinoquinazoline with ethyl ether of 2-hydroxyimino-3-oxobutanoic acid .....	706
<b>Antishin D. V., Vasilishin D. V., Krasikova T. V., Gubin D. D.</b> Typha latifolia as an alternative source of cellulose .....	709
<b>Antishin D. V., Gubin D. D., Krasikova T. V., Vasilishin D. V.</b> Study of the dependence of the properties of the emulsion explosive in the process of storage of the emulsifier .....	711
<b>Antishin D. V., Krasikova T. V., Vasilishin D. V., Gubin D. D.</b> Extractive substances of typha latifolia .....	713
<b>Golenko E. I., Bobrova A. V., Root E. V.</b> Synthesis of ethyl-2-(3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazol-1-yl)acetate .....	715
<b>Kashapova N. R., Zhirnova E. A.</b> Method for measuring the volume and mass of petroleum products in tankers .....	717
<b>Kulieva E. Sh., Pozdeeva A. N., Bobrova A. V., Root E. V.</b> Synthesis of n-benzyl-3,5-diphenyl-4-nitrosopyrazole .....	720
<b>Kuchina K. Yu., Polienko T. V., Suboch G. A.</b> N-alkylation of 3,5-dimethyl-4-nitroso-1H-pyrazole with p-nitrobenzyl bromide .....	723
<b>Levchenko S. I., Pen V. R., Chijov Y. V., Mascadynov L. E.</b> Evaluation of impurities in monomers used in obtaining dental products by NMR method .....	726

<b>Nizhibovskaya D. K., Ageev Y. I., Bobrov P. S., Suboch G. A.</b> Cyclocondensation of 2-hydrazinylpyrimidine with 2-hydroxymino-1,3-diphenylpropane-1,3-dione .....	729
<b>Pen V. R., Levchenko S. I.</b> Electrochemical generation of wood delignification agents .....	732
<b>Pekhotin K. V., Golubtsova O. A., Kruglyakova L. A.</b> Thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane in ammonium selenate and ammonium tetraborate presence .....	734
<b>Pozdeeva A. N., Kulieva E. Sh., Bobrova A. V., Root E. V.</b> Proof of the structure of n-propyl-3,5-diphenyl-4-nitrosopyrazole using <sup>1</sup> H NMR spectroscopy .....	737
<b>Polezhaeva N. I., Wolf V. A.</b> Thermo-oxidative destruction of flux, betulinol diphthalate .....	739
<b>Polezhaeva N. I., Lamberg E. R.</b> Thermal destruction of flux, betulinol diphthalate .....	742
<b>Polezhaeva N. I., Logachev N. I.</b> Flux, betulinol diphthalate, for soldering pastes .....	745
<b>Polienko T. V., Kuchina K. Yu., Kositsyna A. S.</b> Preparation of 1,4-bis((3,5-dimethyl-4-nitroso-1h-pyrazole-1-yl)methyl)benzene .....	748
<b>Pushnitsa A. S., Vlasov V. V., Cherepanov A. N.</b> Effects of the vulcanizing group on the strength properties of elastomeric materials under repeated deformation at low temperatures .....	751
<b>Romanchenko A. S., Volkova D. S., Kukushkin A. A.</b> Study of acidic properties of 3(5)-(naphthalene-2-yl)-4-nitroso-5(3)-(trifluoromethyl)-1h-pyrazole .....	754
<b>Romanchenko A. S., Kukushkin A. A.</b> Synthesis of copper chelate of pyridyl-containing 1,3 diketone .....	756
<b>Chijov Y. V., Pen V. R., Levchenko S. I., Mascadynov L. E.</b> Dynamics of mass transfer of residual monomers from the polymer volume to an aqueous alcohol solution .....	759

Section

“TECHNOSPHERE SAFETY”

<b>Bel'skaya E. N., Taseiko O. V.</b> Parameterization of NO <sub>2</sub> scattering processes .....	763
<b>Efremova I. S., Saulova T. A., Taseiko O. V., Postnikova U. S.</b> Improving the efficiency of industrial premises air purification .....	766
<b>Zheltukhina J. A., Kuskashov P. N., Belskaya E. N.</b> Analysis of the types of impact and methods of protection against ionizing radiation on the example of the nuclear enterprise FSUE “MCC” .....	769
<b>Kalekulin V. B., Gudaeva E. A.</b> State and quality of the Kacha river in the Krasnoyarsk region .....	772
<b>Kotov A. V., Taseiko O. V.</b> Vertical distribution of pollution in urban developments .....	776
<b>Makar N. V., Soboleva S. V., Voronin V. M.</b> Investigation of soil contamination during the extraction and transportation of commercial .....	778
<b>Macharnis A. V., Kryilova O. K., koshevaya V. V.</b> Forest fire probability assessment in the educational and experimental leskhoz SibGU im. M. F. Reshetneva .....	781
<b>Saulova T. A.</b> Bionic indicators of plants of an urbanized landscape .....	784
<b>Saulova T. A., Zaitseva I. A.</b> Analysis of methods for assessing occupational risks .....	787
<b>Timosheva A. Yu., Belskaya E. N.</b> The implementation of a swarm of drones in a satellite-based monitoring of forest fires .....	790
<b>Tkacheva A. E., Potapova V. O., Shcherbina A. S., Shcherbina E. V., Zhirnova E. A.</b> Metrological support in the field of occupational safety .....	793
<b>Cherkasova N. G., Cherkasov L. E.</b> Investigation of the possibility of using spent aviation fuel as a secondary resource .....	796

Section

“RENEWABLE FEEDSTOCKS COMPLEX PROCESSING”

<b>Arkanova M. E., Demidenko N. Y., Tarnopolskaya V. V., Eremenko O. N.</b> Prospects of using shive of technical hemp .....	800
<b>Voinov N. A., Frolov A. S., Bogatkova A. V., Chernov V. A.</b> Method for creating interphase surface in the apparatus with a stirmer .....	803
<b>Zyryanov D. E., Reshetova N. S., Petrova A. A., Alashkevich Yu. D.</b> Influence of the profile of a multi piece knife set of disk mill on the refining of softwood pulp .....	806
<b>Imamov A. A., Luchkin M. A., Prikatov I. I., Ambrosovich Y. A., Marchenko R. A.</b> Faut wood for chemical processing .....	809

---

<b>Isaeva E. V., Mamaeva O. O., Barinova N. S.</b> Influence of extracts from poplar leaves on growth indicators of moldy wheat seeds .....	811
<b>Kaplyov E. V., Patrakov V. A., Yurtaeva L. V.</b> Analysis of methods for obtaining filter paper .....	814
<b>Karelina A. A., Alashkevich Y. D.</b> Dependence of the degree of refining on time in the refining of annual plants .....	817
<b>Karetnikova N. V.</b> Hemp peroxide cellulose .....	820
<b>Kolosova E. R., Vasilyeva D. Y., Yurtaeva L. V.</b> Factors affecting the mechanical strength of paper .....	823
<b>Lopatin A. Yu., Tyumentseva A. E., Eskin V. D., Krivorotova A. I.</b> Composite materials from waste wood raw materials .....	826
<b>Petrova A. A., Voronin I. A., Alashkevich Yu. D., Zyryanov D. E.</b> Dependence of physical and mechanical indicators of paper on the type of the knife surface of the grinding set .....	828
<b>Popova M. M., Slizikova E. A., Tokoyakova N. N., Marchenko R. A., Shurkina V. I.</b> The main advantages and disadvantages of using waste paper .....	831
<b>Rogova E. A., Alashkevich Y. D., Kozhukhov V. A., Lapin I. R.</b> Methods for obtaining bacterial cellulose .....	834
<b>Romanova M. N., Shimova Y. S., Lis E. V.</b> Using alternative forest resources to preserve valuable siberian tree species .....	837
<b>Slizikova E. A., Shurkina V. I., Marchenko R. A.</b> Eco-wool as an eco-friendly material from recycled materials .....	840
<b>Tarnopolskaya V. V., Koh Zh. A., Eremenko O. N., Yagudina G. Z.</b> Evaluation of prospects for the use of nontraditional plant raw materials for functional drinks production .....	843
<b>Tyumentseva A. E., Lopatin A. Yu., Eskin V. D., Krivorotova A. I.</b> Wood composites based on modified wood bark .....	845
<b>Ushakov A. V., Alashkevich Y. D., Karelina A. A., Reshetova N. S.</b> Effect of pulp consistence during refining on average fiber length .....	847
<b>Fedorov V. S., Ryazanova T. V., Mamaeva O. O.</b> Bioconversion as a method of disposal of wood waste of the common pine <i>Pinus Sylvestris</i> .....	850
<b>Khudov D. A., Shotov A. A., Chistova N. G., V Matygulina. N.</b> The use of mineral additives in the production of fiberboard dry method .....	853
<b>Chernikov P. V., Trimasova O. V., Kozhukhova N. Y.</b> Analysis of the structures of rotating furnaces for producing incined petroleum coke .....	856
<b>Yagudina G. Z., Sadaeva A. S., Tarnopolskaya V. V.</b> Coniferous wood waste as a substrate for bioconversion .....	859