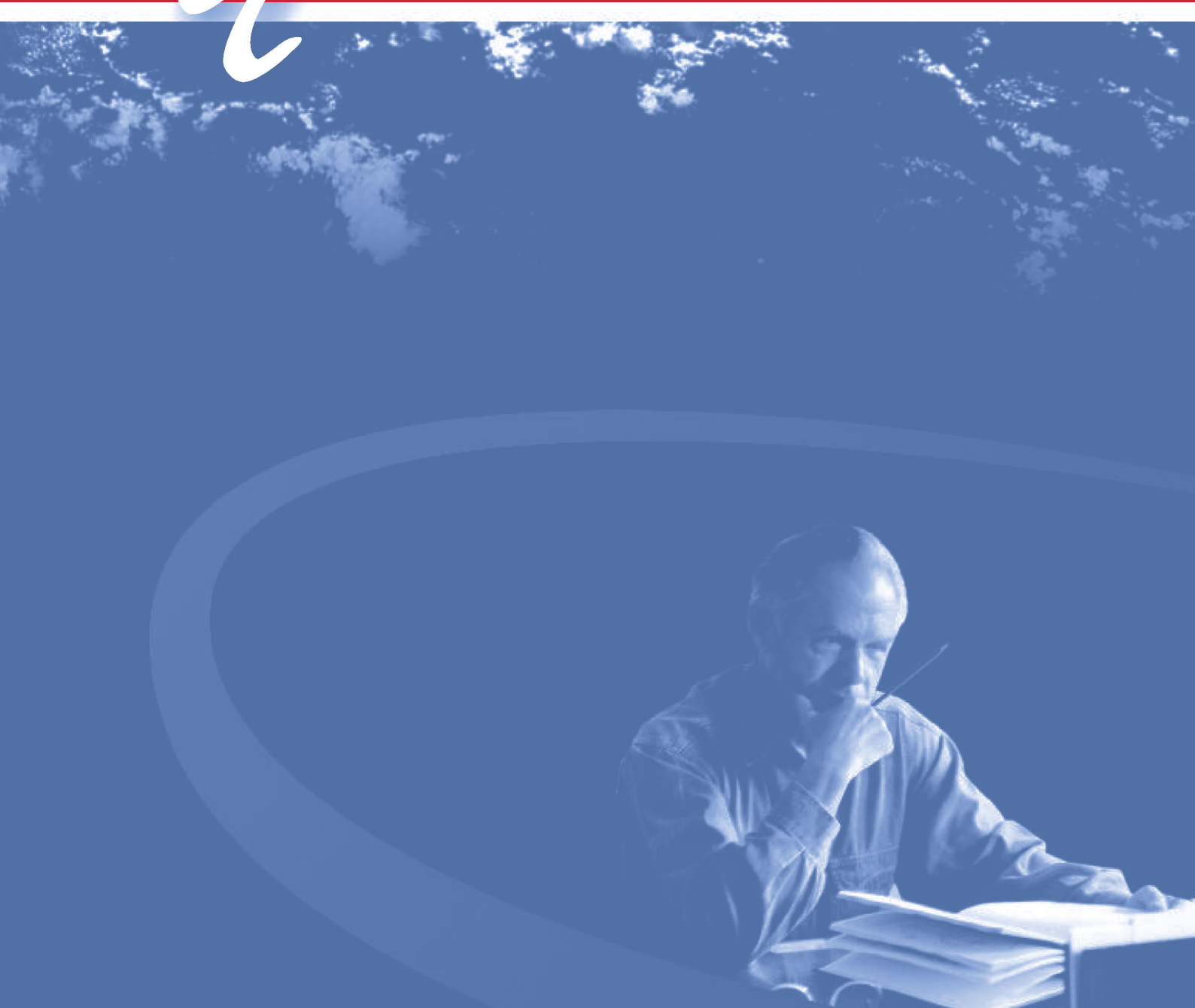


# Д Т У ЕШЕТНЕВСКИЕ ТЕНИЯ

ISBN 978-5-86433-789-9



Часть 1  
•  
XXIII

Красноярск • 2019

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

при поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации  
Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС»  
Правительства Красноярского края  
Совета ректоров вузов Красноярского края  
Федерации космонавтики России  
АО «ЦКБ «Геофизика»  
АО «НПП «Радиосвязь»  
ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система»



**РЕШЕТНЕВСКИЕ  
ТЕНИЯ**

---

*Материалы XXIII Международной научно-практической конференции,  
посвященной памяти генерального конструктора  
ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева  
(11–15 ноября 2019, г. Красноярск)*

В 2 ЧАСТЯХ. ЧАСТЬ 1

Электронное издание

Красноярск 2019

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019

УДК 629.7  
ББК 30 + 2  
P47

**Редакционная коллегия:**

Ю. Ю. ЛОГИНОВ (председатель), Ю. Д. АЛАШКЕВИЧ, Е. В. БЕЛЯКОВА, В. Г. БОНДАРЕНКО,  
Е. Н. ГОЛОВЕНКИН, В. В. ДВИРНЫЙ, Д. В. ДЫМОВ, С. П. ЕРЕСКО, Л. В. ЕРЫГИНА, В. В. ЗОЛОТАРЕВ,  
Е. В. ИСАЕВА, И. Н. КАРЦАН, А. А. КИШКИН, В. А. ЛАПКО, В. А. ЛЕВКО, А. Ю. ЛИТВИНЧУК,  
М. В. ЛУКЬЯНЕНКО, Ю. В. МАКСИМОВ, А. В. МЕДВЕДЕВ, И. А. МИСИНЕВА, В. М. МИХАЛКИН,  
А. Е. МИХЕЕВ, В. В. МОСКВИЧЕВ, А. В. МУРЫГИН, В. П. НАЗАРОВ, В. И. ОРЛОВ, М. В. ОСТРОУШЕНКО,  
А. С. ПАРШИН, О. Е. ПОДВЕРБНЫХ, Л. В. РУЧКИН, М. В. САВЕЛЬЕВА, К. В. САФОНОВ, С. И. СЕНАШОВ,  
А. А. СТУПИНА, Г. А. СУБОЧ, О. В. ТАСЕЙКО, М. С. ТОВБИС, М. Н. ФАВОРСКАЯ, В. Х. ХАНОВ,  
Ю. П. ЮРОНЕН, В. Г. ЯЦУНЕНКО

**Под общей редакцией**

доктора физико-математических наук Ю. Ю. ЛОГИНОВА

**Решетневские чтения** [Электронный ресурс] : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (11–15 нояб. 2019, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 21,1 МБ). – Систем. требования : Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – Ч. 1. – Режим доступа: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-789-9

Сборник содержит материалы XXII 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 978-5-86433-789-9



Подписано к использованию: 09.11.2019. Объем: 21,1 МБ. С 239/19.

Корректор *Л. В. Звонарева*

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](mailto:rio@mail.sibsau.ru). Тел. (391) 201-50-99.



*Уважаемые коллеги!*

**Приветствуем вас на XXIII 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 и в этом году мы отмечаем 95-летие со дня рождения Михаила Федоровича Решетнева.

С именем М. Ф. Решетнева неразрывно связана история развития предприятия АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), которому в этом году исполнилось 60 лет со дня основания. Результатом работы компании АО «ИСС», по праву считающейся центром российского спутникостроения, является создание более 1 280 космических аппаратов, на базе которых введено в эксплуатацию более 40 космических систем. Предприятие АО «ИСС» сегодня – единственный в России производитель космических аппаратов навигации, геодезии, ретрансляции, создатель самых мощных и современных спутников связи. Аппараты производства АО «ИСС» помогают укреплять национальную безопасность, повышать эффективность экономической деятельности, решать задачи социальной сферы.

Имя академика М. Ф. Решетнева также вписано в историю развития ведущего предприятия по производству ракетно-космической техники АО «Красмаш», когда Михаил Федорович начинал свою деятельность в качестве руководителя восточного филиала ОКБ-1 С. П. Королева, решая задачи конструкторского сопровождения серийного производства баллистических ракет, а с начала 1960-х годов – задачу разработки ракеты-носителя легкого класса типа «Космос» и малых связных космических аппаратов. За прошедшие годы на предприятии АО «Красмаш» освоено производство четырнадцати модификаций разгонных блоков, среди которых базовые модули разгонных блоков ракет-носителей «Протон» и «Зенит», предназначенных для вывода космических аппаратов на высокоэнергетические орбиты.

На протяжении всей деятельности академика М. Ф. Решетнева и по настоящее время университет тесно сотрудничает с АО «ИСС», АО «Красмаш», АО «ЦКБ Геофизика», АО «НПП Радиосвязь», АО «КБ Искра» и Федеральным исследовательским центром «КНЦ СО РАН».

Особое место в деятельности университета занимают совместно созданные с базовыми предприятиями и институтами РАН Научно-образовательные центры «Институт космических исследований и высоких технологий» (НОЦ ИКИВТ), «Космические системы и технологии» (НОЦ КСТ), «Замкнутые космические системы» (НОЦ ЗКС), «Управление космическими системами» (НОЦ УКС) и «Ракетно-космические технологии» (НОЦ РКТ).

В 2019 году проводится очередная, юбилейная XXIII международная конференция «Решетневские чтения». Общее число участников в этом году более 1 000, из них в конференции с докладами планируют выступить 530 человек из 35 предприятий и НИИ, 22 университетов, 6 стран и 22 городов. Число секций конференции составляет 31. В этом году расширена тематика конференции. Добавлены новые секции – «Технология ракетостроения» и «Прикладная информатика». С 2015 года избранные труды конференции публикуются в журнале Conference Series: Materials Science and Engineering, который индексируется в Scopus.

Тематика, решаемые научно-технические проблемы, направления и специальности подготовки кадров, связанные с перспективными направлениями развития университета, обосновываются задачами, определенными Федеральной космической программой, задачами, возложенными на предприятия космической отрасли, а также сложившимися в вузе научными школами и направлениями научных исследований, созданной университетом совместно со стратегическими партнерами инфраструктурой инновационной и научно-образовательной деятельности. «Космические информационные системы» – одно из приоритетных направлений, по которому университет занимает лидирующие позиции в РФ в подготовке кадров и в области исследований, связанных с разработкой и модернизацией отечественных космических информационных систем, совершенствованием космических аппаратов (КА), систем и комплексов различного назначения: фиксированной и мобильной связи, телевидения, навигации, геодезии, ретрансляции. В университете проводятся научные исследования, проектирование и разработка перспективных платформ автоматических КА оборонного и гражданского назначения, малых космических аппаратов, разрабатываются системы управления КА и методы использования космических информационных систем.

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 23 года своего существования конференция стала основой для интеграции образования, науки и производства, что способствует развитию науки и техники в современном мире.

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

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

*И. о. ректора 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»  
Н. А. Тестоедов*

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



**Секция**

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

УДК 623.746

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЧЕСКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Р. Н. Агаев, Д. А. Осипов, С. Р. Стояновский, А. Г. Ганжин, М. С. Беляцкий

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»  
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а  
E-mail: nurad@yandex.ru

*С учетом того, что в Вооруженных силах Российской Федерации имеется острая необходимость в создании собственных стратегических беспилотных летательных аппаратов, в статье рассмотрена процедура проектирования беспилотного летательного аппарата.*

*Ключевые слова: проектирование, 3D-модель, стратегический, беспилотный летательный аппарат.*

## DESIGN OF THE STRATEGIC UNMANNED AIRCRAFT

R. N. Agaev, D. A. Osipov, S. R. Stoyanovskiy, A. G. Ganjin, M. S. Belyackiy

Military Educational Scientific Center Air Force "Air force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"  
54a, Old Bolsheviks Str., Voronezh, 394064, Russian Federation,  
E-mail: nurad@yandex.ru

*An unmanned aircraft is considered on the basis of special experimental and theoretical research, taking into account that the Armed Forces experience an urgent need for their own perspective reconnaissance aircraft.*

*Keywords: design, 3D model, strategic; unmanned aircraft.*

Разработка беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) – одно из наиболее перспективных направлений развития современной военной авиации.

Беспилотные летательные аппараты или дроны уже привели к значительным изменениям в тактике ведения боевых действий, ожидается, что уже в ближайшем будущем их значение возрастет еще больше.

Прогресс беспилотных летательных аппаратов – это, вероятно, самое важное достижение авиации за последние десятилетия. Сегодня БпЛА используют не только военные, они активно применяются и в гражданской авиации. Они могут использоваться для аэрофотосъемки, патрулирования, геодезических изысканий, мониторинга объектов и даже для доставки покупок. Однако тон в разработках новых беспилотных воздушных систем все же задают именно военные. Военные БпЛА выполняют множество задач.

Предлагаемый БпЛА может удовлетворить большое количество потребностей в военной и гражданской области применения, а именно:

- проводить разведку и передавать информацию в режиме реального времени;
- применение авиационных средств поражения по наземным и воздушным целям;
- патрулирования территории на больших расстояниях и с больших высот;
- мониторинг объектов.

Первоначальная, она же главная задача, – это разведка. Беспилотный летательный аппарат с конструкцией малой заметности и продолжительного времени полета, которое составляет не менее 18 часов, помог бы решить данную задачу. Такие условия требуют создания БпЛА как можно с более высокой экономичностью расхода топлива.

Основные тактико-технические характеристики, предъявляемые к проектируемому БпЛА, получены на основе анализа статистических данных о ранее разработанных или перспективных образцах отечественных и зарубежных летательных аппаратов [1; 3; 4]:

- нагрузка целевая – 2500 кг;
- число М полета крейсерское – 0,5;
- высота полета – 18 км;
- дальность полета – 5000 км.

По итогам проведенных расчетов были получены геометрические параметры БпЛА большого радиуса действия (рис. 1 и 2).

На беспилотном летательном аппарате предполагается установить проектируемый двигатель, который имеет удовлетворяющие характеристики [2; 5]:

- тяга – 42 кН;
- $C_{уд} = 0,1$  кг/Н·ч;
- применяемое топливо – Т-1, ТС-1, РТ.

Конечным этапом проектирования БпЛА, является создание и испытание натурной модели проектируемого БпЛА, а также построение 3D-модели (рис. 3).

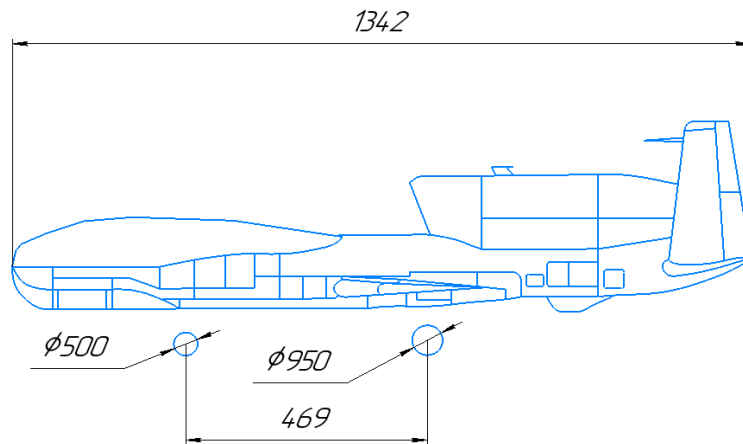


Рис. 1. Проектируемый БПЛА. Вид сбоку

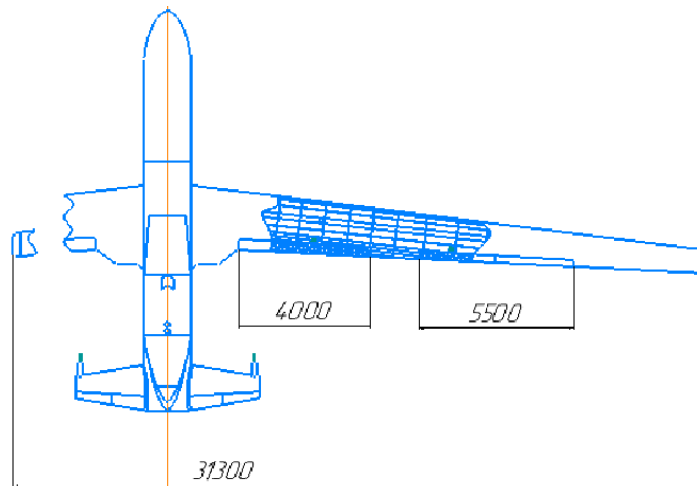


Рис. 2. Проектируемый БПЛА. Вид сверху

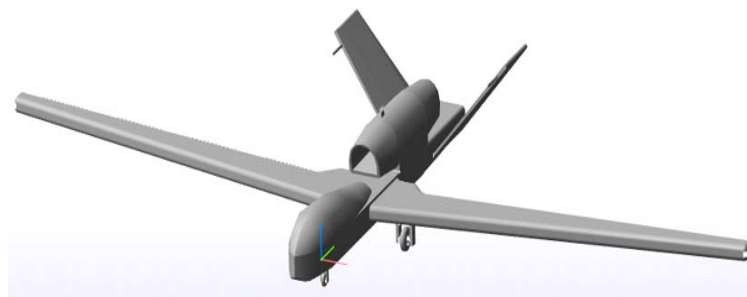


Рис. 3. 3D-модель БПЛА большого радиуса действия. Вид общий

Разработанная модель БПЛА будет помещена в программу ANSYS Fluent с целью определения влияния внешней среды в условиях искусственного полета БПЛА.

Будет создана искусственная аэродинамическая труба, куда поместится БПЛА. Далее будет создана сетка, необходимая для максимального приближения условий полета к внешним условиям. После создания

сетки произведутся аэродинамические расчеты, по которым можно оценить влияние потока на планер и определить критические точки и давление на фюзеляж.

#### Библиографические ссылки

1. Выбор основных параметров самолета : учеб. пособие. Воронеж : ВУНЦ ВВС, 2012. 125 с.;



2. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов / под ред. Н. С. Голубева, Ю. И. Янкевича. М. : МАИ, 2005. 283 с.

3. Федоров Р. М., Полев А. С., Дрыгин А. С. Расчет параметров и характеристик ТРДД и ТРДДСМ. М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2002.

4. Казанджан П. К., Тихонов Н. Д. Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин. М. : Машиностроение, 1995. 316 с.

5. Теория авиационных двигателей : в 2 ч. / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров, В. Н. Котовский, А. С. Полев ; под ред. Ю. Н. Нечаева. М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2012. Ч. 2.

#### References

1. The choice of the main parameters of the aircraft : textbook. Voronezh : Air Force Research Center, 2012. 125 p.

2. Fundamentals of the design, engineering, construction and production of aircraft / Edited by N. S. Golubeva, Y. I. Yankevich. Moscow, MAI, 2005. 283 p.

3. Fedorov R. M., Polev A. S., Drygin A. S. Calculation of parameters and characteristics of turbofan engines and turbofan engines. Moscow, Publishing. VVIA them. prof. N. E. Zhukovsky, 2002.

4. Kazanjan P. K., Tikhonov N. D. Theory of aircraft engines. Theory of blade machines. Moscow, Mechanical Engineering, 1995. 316 p.

5. Theory of aircraft engines : in 2 hours / Y. N. Nechaev, R. M. Fedorov, V. N. Kotovsky, A. S. Polev ; under the editorship of Y. N. Nechaeva. Moscow, Publishing. VVIA them. prof. N. E. Zhukovsky, 2012. Part 2.

© Агаев Р. Н., Осипов Д. А., Стояновский С. Р., Ганжин А. Г., Беляцкий М. С., 2019

УДК 629.764.3

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СПАСЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО ГРУЗА

А. С. Алешина<sup>1</sup>, Д. А. Замятин<sup>2</sup>, В. В. Кольга<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аэрокосмическая школа

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, ул. Иркутская, 2

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: ae1523@mail.ru

*Описаны принципы работы системы спасения спускаемого аппарата, проведено экспериментальное исследование эффективности различных парашютных систем.*

*Ключевые слова: система спасения, парашютная система, спускаемый аппарат, полезный груз.*

## THE DESIGNING OF PAYLOAD RESCUE SYSTEM

A. S. Aleshina<sup>1</sup>, D. A. Zamyatin<sup>2</sup>, V. V. Kolga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aerospace School

2, Irkutskaya Str., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ae1523@mail.ru

*The principles of the space capsule rescue system are described, the experimental study of various parachute systems effectiveness is conducted.*

*Keywords: rescue system, parachute system, space capsule, payload.*

**Введение.** В настоящее время большинство задач космонавтики решается без нахождения человека на орбите, однако, сохраняется актуальность и пилотируемой космонавтики. Подтверждением этому служит наличие у ведущих космических держав мира крупномасштабных космических программ с упором на пилотируемые миссии, активная разработка и испытание соответствующих аппаратов, таких как космические корабли «Федерация» (РФ) или «Crew Dragon» (США). Наиболее массовым спускаемым аппаратом на сегодняшний день является «Союз-ТМА», на его примере будет рассмотрен процесс возвращения космонавтов на Землю [1; 2].

Организация пилотируемого полета существенно отличается от беспилотных миссий; все работы по проведению динамических операций в космосе разделяются на проектный и оперативный этапы; в случае пилотируемых миссий эти этапы, как правило, занимают значительно больше времени. Далее рассматривается в основном оперативная часть, так как работы по баллистическому проектированию спуска сводятся в основном к оптимизации факторов, влияющих на безопасность и комфорт экипажа при посадке.

После расстыковки корабля есть некоторое время до включения тормозного двигателя. В это время происходит проверка всего оборудования, проводятся измерения траектории и уточняется точка посадки. Затем включается тормозной двигатель. При штатной

отработке импульса через некоторое время происходит разделение отсеков корабля. Если при входе в атмосферу система управления спуском решает, что она не в состоянии обеспечить приземление спускаемого аппарата в точке с требуемыми координатами, корабль «срывается» в баллистический спуск. В этом случае необходимо быстро уточнить предполагаемую точку посадки и передать ее поисково-спасательной службе (ПСС).

При штатном управляемом спуске корабль начинают «вести» специалисты ПСС.

Парашютная система раскрывается на высоте порядка 12 км. К этому моменту система управления спуском уже не может скорректировать траекторию. На аппарат действует только ветровой снос, составляющий до 80 % от допустимого радиуса круга рассеивания [3].

На примере «Союз-ТМА» рассмотрены основные этапы приземления спускаемого аппарата. Как видно, важную роль в данном процессе играет парашютная система [4].

Практическая часть исследования сводится к моделированию посадки спускаемого аппарата в целях оценки параметров спуска в зависимости от типа системы спасения. Для этого были построены модели ракет с равными массогабаритными характеристиками, оснащенные различными парашютными системами. Посадка модели оценивается по двум основным критериям – скорость спуска и ветровой снос.

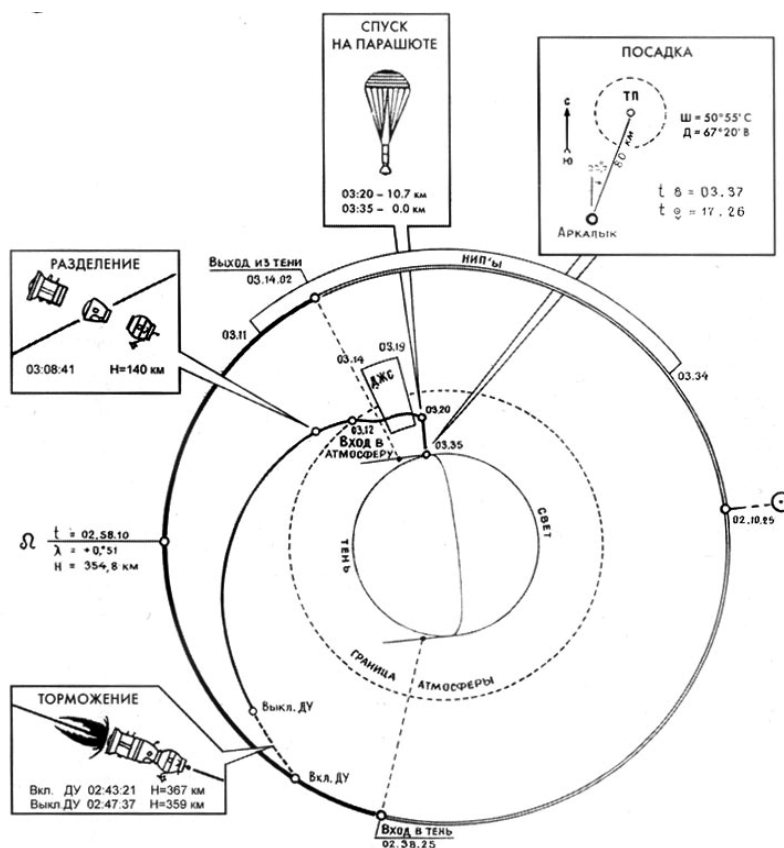


Схема возвращения на землю спускаемого аппарата «Союз-ТМА»

От скорости спуска напрямую зависит целостность модели спускаемого аппарата, от ветрового сноса – оперативность поиска после приземления. Важными требованиями при проектировании системы спасения являются также технологичность её конструкции и надёжность срабатывания [5].

Надёжность срабатывания системы обратно пропорциональна сложности её конструкции. По данному критерию, а также по технологичности изготовления, наиболее выгодно проявляет себя система спасения с ленточным парашютом, применяющаяся на большинстве лёгких моделей ракет.

Однако целесообразность её применения существенно уменьшается в случае с полезным грузом массой от 500 г и более из-за быстро растущей скорости снижения, зачастую приводящей к нарушению целостности груза при контакте с землёй.

Для более крупных моделей ракет, как правило, применяют парашюты купольного типа, значительно эффективнее использующие сопротивление воздуха для погашения скорости полезного груза. К немногочисленным недостаткам купольных систем спасения относится меньшая надёжность срабатывания, (возможны случаи спутывания строп, недостаточно быстрого раскрытия купола), а также существенная подверженность ветровому сносу.

Роторные системы спасения представляют собой одну или несколько лопастей, задающих вращение, снижая скорость спуска полезного груза и одновременно стабилизируя его. Такие системы спасения ме-

нее распространены ввиду высокой сложности изготовления, однако, позволяют в широком диапазоне задавать параметры снижения полезного груза, путём подбора геометрических характеристик и количества лопастей. В среднем, по скорости снижения и подверженности ветровому сносу роторная система спасения занимает промежуточное место между ленточной и купольной.

При обеспечении должной технологичности изготовления, возможность «программирования» скорости и траектории делают роторные системы спасения перспективными в случаях повышенных требований к сохранности полезного груза.

В частности, вызывает интерес возможность корректировки траектории непосредственно в процессе снижения полезного груза с целью компенсации ветрового сноса при помощи комбинирования роторной системы спасения и аэродинамических органов управления. Реализация данной перспективы является следующим этапом развития проектно-исследовательской работы.

#### Библиографические ссылки

1. РКК «Энергия» – Международная космическая станция [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energia.ru/ru/iss/soyuz-tm/soyuz-tm.html> (дата обращения: 10.07.2019).
2. На «Союзе» к МКС и обратно [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/240103/> (дата обращения: 10.07.2019).

3. Пилотируемая посадка космического аппарата [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/205520/> (дата обращения: 10.07.2019).

4. НК 1999-10a [Электронный ресурс]. URL: <http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/nk/1999/10/1999-10a.html> (дата обращения: 22.05.2019).

5. Парашюты на космических кораблях | Авиация - коммерческая, гражданская, спецавиация... [Электронный ресурс]. URL: <http://ooobskspetsavia.ru/2015/11/05/parashyuty-na-kosmicheskix-korablyax/> (дата обращения: 22.05.2019).

#### References

1. РКК “Energiya” – Mezhdunarodnaya kosmicheskaya staniya. [PAO “Energiya” – International Space Station] [Electronic resource]. URL: <https://www.energiya.ru/ru/iss/soyuz-tm/soyuz-tm.html> (access: 10.07.2019).

2. Na “Soyuze” k MKS i obratno. [By “Soyuz” to ISS and back] [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/post/240103/> (access: 10.07.2019).

3. Pilotiruemaya posadka kosmicheskogo apparata. [Manned spacecraft landing] [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/post/205520/> (access: 10.07.2019).

4. НК 1999-10a. [Electronic resource]. URL: <http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/nk/1999/10/1999-10a.html> (access: 22.05.2019).

5. Parashyuty na kosmicheskix korablyah | Aviaciya - kommercheskaya, grazhdanskaya, specaviaciya.... [The parachutes on the spacecraft | aviation – commercial, civil, specialiaze...] [Electronic resource]. URL: <http://ooobskspetsavia.ru/2015/11/05/parashyuty-na-kosmicheskix-korablyax/> (access: 22.05.2019).

© Алешина А. С., Замятин Д. А.,  
Кольга В. В., 2019

УДК 629.76

## СОВРЕМЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА СХЕМ ПОЛЕТА МЕЖПЛАНЕТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е. Г. Баранова, Т. Г. Орешенко, С. В. Харлашина\*

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

*Рассмотрены аспекты алгоритма расчета схем полета межпланетных летательных аппаратов, также выявлен ключевой компонент расчета схемы полета. Приведены наблюдения о способах перемещения летательных аппаратов. Также рассмотрен конкретный пример современного алгоритма расчета схем полета летательных аппаратов.*

*Ключевые слова: летательный аппарат, алгоритм, схема полета, навигация.*

## MODERN ALGORITHMS FOR CALCULATING THE FLIGHT DIAGRAMS OF THE INTERPLANETARY AIRCRAFT

E. G. Baranova, T. G. Oreshenko, S. V. Kharlashina\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: Kharlashina.v@mail.ru

*This paper discusses aspects of the algorithm for calculating the flight patterns of interplanetary aircraft, and also identifies a key component of the calculation of the flight pattern. Observations on the methods of moving aircraft are given. Also, a specific example of a modern algorithm for calculating flight patterns of aircraft is considered.*

*Keywords: aircraft, algorithm, flight pattern, navigation.*

Задачи исследования планет и малых небесных тел Солнечной системы на сегодняшний день являются весьма перспективными. Работы в этом направлении ведутся во многих странах мира, осуществляющих космическую деятельность. Такие исследования позволят изучить физику небесных тел, входящих в состав Солнечной системы, выявить наличие у них различных ресурсов, изучить многие вопросы теории образования Солнечной системы и других звездных систем, а также ответить на многие другие вопросы [1].

Одним из важных вопросов космической механики является схема полета межпланетных летательных аппаратов (ЛА), и алгоритм её расчета включает в себя следующие аспекты: разработка эталонной траектории, которая описывает запланированную траекторию полета космического корабля; отслеживание фактического положения космического корабля во время полета; создание маневров, чтобы привести корабль обратно к исходной траектории, когда она отклонилась [2].

Способность измерять величины, имеющие математическое отношение к движению ЛА, является ключевым компонентом расчета схемы его полета. К значимым измерениям можно, например, отнести расстояние от Земли до ЛА и прочие. Поскольку большинство измерений связаны с Землей, необходимо, чтобы собственные орбитальные параметры Земли были хорошо известны, поэтому измерения

имеют смысл в ориентированном на солнце (гелиоцентрическом) эталоне.

Ежедневные измерения Доплера и дальности не дают непосредственного бокового движения ЛА в глубине Солнечной системы (если мы определяем боковое движение как любой компонент движения, кроме как непосредственно к Земле или от Земли). Но на сегодняшний день в мире существует понимание того, как все движется в космосе – модели космических кораблей строятся на основе кеплеровских, ньютоновских и эйнштейновских уравнений движения. Кроме того, приняв упрощенную модель планетных орбит, можно обратиться к гомановским траекториям, которые в свою очередь используются для перехода между двумя орбитами, обычно находящимися в одной плоскости. В простейшем случае они пересекают эти две орбиты в апоцентре и перицентре [3]. Существует не так много способов перемещения (иными словами, траекторий), которые могли бы совпадать с большим набором данных о дальности и доплеровских данных, полученных с различных станций за период или дни, недели или месяцы. Задача состоит в том, чтобы применить измерения Доплера к модели траектории и обновить эту модель, чтобы она соответствовала всем измерениям для получения решения проблемы определения орбиты [4].

В настоящее время инженеры НАСА испытали такой алгоритм расчета схем полета межпланетных ЛА, как «Топливо-оптимальный алгоритм наведения при

большом отклонении» (G-FOLD). Данный алгоритм прошел летные испытания в сочетании с космическими системами Masten в воздушно-космическом порту Мохаве в Калифорнии. Согласно данным НАСА, G-FOLD, автономно генерирует оптимальные топливные траектории посадки в режиме реального времени и предоставляет новую ключевую технологию для точной посадки на планете. Для пилотируемых миссий это минимизирует затраты топлива, что позволит увеличить массу полезных грузов [5].

Подытожив все вышеизложенное, хочется отметить, что существующие алгоритмы расчета схем полета межпланетных ЛА, в большинстве своем унаследованы из прошлого века. Эти алгоритмы не оптимизируют использование топлива и существенно ограничивают маневренность и точность приземления корабля.

#### Библиографические ссылки

1. Ельников Р. В. Проектирование межпланетных траекторий космических аппаратов с электроракетными двигательными установками при использовании лунного гравитационного маневра. «Реглет» 119526 : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. С. 1–4
2. Основы космического полета [Электронный ресурс]. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/basics/chapter13-1/> (дата обращения: 31.08.2019).
3. Ценный дар небесной механики [Электронный ресурс]. URL: [http://crydee.sai.msu.ru/Universe\\_and\\_us/4num/v4pap2.htm](http://crydee.sai.msu.ru/Universe_and_us/4num/v4pap2.htm) (дата обращения: 4.09.2019).
4. Межпланетный полет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.braeunig.us/space/interpl.htm> (дата обращения: 31.08.2019).
5. Мировая сеть [Электронный ресурс]. URL: <https://www.networkworld.com/article/2225165/nasa-details-software-algorithm-that-could-precisely-guide-future-spacecraft-landings.html> (дата обращения: 31.08.2019).

#### References

1. Elnikov R. V. Design of interplanetary trajectories of spacecraft with electric propulsion systems using the lunar gravitational maneuver. “Reglet” 119526 : Abstract of diss. ... cand. of techn. sciences. Moscow, 2012. P. 1–4.
2. Basics of Space Flight [Electronic resource]. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/basics/chapter13-1/> (access: 31.08.2019).
3. Valuable gift of celestial mechanics [Electronic resource]. URL: [http://crydee.sai.msu.ru/Universe\\_and\\_us/4num/v4pap2.htm](http://crydee.sai.msu.ru/Universe_and_us/4num/v4pap2.htm) (access: 4.09.2019).
4. Interplanetary flight [Electronic resource]. URL: <http://www.braeunig.us/space/interpl.htm> (access: 31.08.2019).
5. Network World [Electronic resource]. URL: <https://www.networkworld.com/article/2225165/nasa-details-software-algorithm-that-could-precisely-guide-future-spacecraft-landings.html> (access: 31.08.2019).

© Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г.,  
Харлашина С. В., 2019

## ФОРМИРОВАНИЕ МАЛОЗАТРАТНЫХ СХЕМ ПОЛЕТА В ПРЕДЕЛАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Е. Г. Баранова\*, Т. Г. Орешенко, С. В. Харлашина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: katerina.gudaeva@mail.ru

*Рассмотрены малозатратные схемы полетов космических аппаратов в пределах Солнечной системы. Также приведены конкретные примеры использования определенного маневра в своих миссиях.*

*Ключевые слова: космический аппарат, межпланетные перелеты, орбита, траектории, Солнечная система.*

## FORMATION OF LOW-COST FLIGHT SCHEMES WITHIN THE SOLAR SYSTEM

E. G. Baranova\*, T. G. Oreshenko, S. V. Kharlashina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: katerina.gudaeva@mail.ru

*In this paper low-cost flight schemes of spacecraft within the Solar system are considered. The paper also provides specific examples of the use of a certain maneuver in their missions.*

*Keywords: spacecraft, interplanetary flight, orbit, trajectory, Solar system.*

Космонавтика прочно вошла в нашу повседневную жизнь и принесла человечеству много преимуществ. Это привело к развитию различных технологий, которые возвращаются в экономику и улучшают нашу жизнь на Земле. Без космических программ у нас не было бы GPS, точного прогноза погоды, солнечных батарей или ультрафиолетовых фильтров в солнечных очках и камерах. Сейчас в космосе также проводятся медицинские исследования, которые могут вылечить болезни и продлить человеческую жизнь, и эти эксперименты не могут быть проведены на Земле. В настоящее время насчитывается более семи миллиардов человек, а это очень много. Однако мы все теснимся вместе на этой единственной планете. Если что-то случится с Землей, наш вид может быть уничтожен. Колонизация других тел в Солнечной системе – это способ создать «резервную копию» человечества, которая будет выживать независимо от того, что произойдет с Землей. Планеты Солнечной системы разделены огромными расстояниями, несмотря на мощные двигатели и достижения в науке, для выхода в космос необходимо сжигание большого количества топлива, а это не является хорошим решением, чтобы осуществлять межпланетные перелеты, вследствие высокой стоимости, низкой экологичности и эффективности применяемого топлива. Современные разработки включают несколько схем полета межпланетных КА:

Пожалуй, первым примером более сложного космонавигационного приема могут служить биэллиптические траектории. Особенно актуальны при запуске

геостационарных спутников, которые первоначально выводятся на низкую орбиту с наклоном к экватору, равным широте космодрома, а потом переводятся на геостационарную орбиту (с нулевым наклоном). Использование биэллиптической траектории позволяет заметно сэкономить на топливе [1].

Если первая схема полета подходит больше для запуска спутников, то гравитационные маневры фактически не требуют большого расхода топлива, все что необходимо это наличие небесного тела вблизи траектории полета, которые обладают достаточной сильной гравитацией и подходит своим положением для задачи траектории движения. Когда космический корабль приближается к планете, ее гравитация притягивает гораздо более легкий космический аппарат, так что он догоняет планету на орбите. Это орбитальный импульс от планеты, который дает космическому кораблю огромный прирост скорости. Чем ближе он может лететь, тем больше импульса он получает и тем быстрее он улетает от столкновения. Несмотря на гравитационные маневры, орбиты большинства межпланетных станций все же близки к классическим дугам эллипсов и гипербол. [2].

Но в последнее время астронавигаторы все чаще используют куда более изощренные траектории, пролегающие в тех областях пространства, где приходится в равной мере учитывать притяжение сразу двух небесных тел. Точки Лагранжа – это место в пространстве, где объединенные гравитационные силы двух больших тел, таких как Земля и Солнце или Земля и Луна, равны центробежной силе, ощущаемой гораз-

до меньшим третьим телом. Взаимодействие сил создает точку равновесия, в которой космический аппарат может быть «припаркован» для проведения наблюдений. «Межпланетная супермагистраль», была задумана Мартином Ло, чье программное обеспечение использовалось для проектирования траектории полета для миссии Genesis НАСА, которая в настоящее время использует эту «автостраду в космосе» в своей миссии по сбору частиц солнечного ветра для возвращения на Землю. Каждая планета и луна имеют пять мест в космосе, называемых точками Лагранжа, где гравитация одного тела уравновешивает гравитацию другого. Космический корабль может вращаться там, сжигая очень мало топлива. Чтобы найти Межпланетную супермагистраль, Ло нанес на карту некоторые возможные траектории полета между точками Лагранжа, варьируя расстояние, которое пройдет космический аппарат и скорость его движения. Эти упрощения приводят к уменьшению количества космических аппаратов, необходимых для широкого спектра задач [3].

Гравитационная техника рогатки использует силу тяжести планет и лун, чтобы изменить скорость и направление движения космического аппарата без использования топлива. В типичном примере космический аппарат отправляется на далекую планету по траектории, которая намного быстрее, чем та, что требует передача Hohmann. Это обычно означало бы, что он прибудет на орбиту планеты и продолжит движение мимо нее. Однако если есть планета между точкой отправления и целью, ее можно использовать для изгиба пути к цели, и во многих случаях общее время в пути значительно уменьшается. Ярким примером этого являются два корабля программы Voyager, который использовал эффекты рогатки для изменения траекторий несколько раз во внешней Солнечной системе. Трудно использовать этот метод для путешествий во внутреннюю часть Солнечной системы, хотя можно использовать другие близлежащие планеты, такие как Венера или даже Луна, как рогатки в путешествиях к внешним планетам [4].

Но гравитационные маневры – не единственный способ сэкономить топливо. На протяжении многих лет ученые изучали различные альтернативы химическим ракетам. Один из них это электрический двигатель, который генерирует гораздо меньшую тягу, чем химические ракеты, и слишком слабую, чтобы запустить космический аппарат с поверхности Земли. Однако электрический двигатель гораздо более эффективен, чем химические ракеты, что делает его потенциально очень полезным там, где имеет значение каждый бит

веса, например, с космическим аппаратом, когда обычная ракета переносит его на орбиту или полеты к планете. Это «двигатели открытого космоса», предназначенные для медленного, но непрерывного ускорения, длящегося месяцы, а при межпланетных полетах и годы [5].

#### Библиографические ссылки

1. Траектория движения КА [Электронный ресурс]. URL: <http://galspace.spb.ru/orbita/12.htm> (дата обращения: 31.08.2019).
2. Левантовский В. И., Механика космического полета в элементарном изложении. 3-е изд., дополненное и переработанное. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 318 с
3. Interplanetary Superhighway Makes Space Travel Simpler [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html) (дата обращения: 31.08.2019).
4. Basics of Space Flight [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html) (дата обращения: 31.08.2019).
5. Гришин С. Д., Лесков Л. В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 106 с

#### References

1. The trajectory of the SPACECRAFT [Electronic resource]. URL: <http://galspace.spb.ru/orbita/12.htm> (access: 31.08.2019).
2. Levantovsky V. I., Mechanics of space flight in elementary exposition. 3rd ed., augmented and revised. Moscow, Science. Home edition of physical and mathematical literature, 1980. 318 p
3. Interplanetary Superhighway Makes Space Travel Simpler [Electronic resource]. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html) (access: 31.08.2019).
4. Basics of Space Flight [Electronic resource]. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/genesis/media/jpl-release-071702.html) (access: 31.08.2019).
5. Grishin S. D., Leskov L. V. Electric rocket engines of spacecraft. Moscow, mechanical engineering, 1989. 106 p

© Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г., Харлашина С. В., 2019



УДК 629.73.018

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е. Г. Баранова, Т. Г. Орешенко, С. В. Харлашина\*

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

*Рассмотрены существующие проблемы проектирования систем навигации и ориентации беспилотных летательных аппаратов. Приведены примеры, характеризующие выявленные проблемы. Также в работе представлены перспективы проектирования систем навигации и ориентации беспилотных летательных аппаратов.*

*Ключевые слова: проектирование, беспилотный летательный аппарат, навигация, ориентация.*

## PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DESIGN OF NAVIGATION SYSTEMS AND ORIENTATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

E. G. Baranova, T. G. Oreshenko, S. V. Kharlashina\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: Kharlashina.v@mail.ru

*This paper discusses the existing problems of designing navigation systems and orientation of unmanned aerial vehicles. The examples characterizing the identified problems are given. Also, the paper presents the prospects of designing navigation systems and orientation of unmanned aerial vehicles.*

*Keywords: design, unmanned aerial vehicle, navigation, orientation.*

Задачи интеграции проектирования систем наблюдения и ориентации для беспилотных летательных аппаратов (БЛА) открывают новую широкую область применения методов контроля наблюдения, особенно при выполнении автономных задач полета. Для решения задачи автономного позиционирования БЛА используют современные системы технического зрения, методов теории управления и геометрии. Новый подход к решению задачи состоит в использовании систем компьютерного зрения БЛА; генерации и обработке потока фотокадров подстилающего рельефа [1]. Одной из наиболее важных проблем проектирования является обнаружение ошибочной работы отдельных подсистем наблюдения, в которых решение навигационных задач должно быть перераспределено или перенесено в резервные подсистемы или другие, работающие на иных физических принципах [2].

В России существует несколько частных фирм, которые производят БЛА, но их общий недостаток – цена. Кроме того, БЛА стремительно обретают популярность в гражданской сфере, например, для охраны сельскохозяйственных угодий, картографии и прочее, но для России подобная практика все еще остается проблемой и только начинает внедряться отдельными организациями [3].

Основопологающей системой бортовой аппаратуры управления БЛА является система ориентации для определения углового положения БЛА относительно

опорной системы координат. В малоразмерных БЛА могут применяться бесплатформенные системы ориентации (БСО), реализованные на базе трёх ортогонально расположенных микромеханических датчиков угловой скорости и вычислительного устройства, обеспечивающего обработку сигналов с датчиков и последующее интегрирование по одному из известных алгоритмов. Недостаток БСО – накапливаемая со временем погрешность и, как следствие, ограниченное время работы [4].

Рассмотрим пример, иллюстрирующий проблему проектирования систем навигации и ориентации БЛА: навигация по спутниковым каналам, таким как система глобального позиционирования (GPS), достаточно надежна в простых условиях полета, но на сложной местности (горы, ущелья) она требует использования методов определения своего местоположения с помощью других систем, основанных, например, на ориентирах, либо на использовании оптоэлектронных камер, либо с помощью радара [5]. Здесь возникает серьезная проблема преобразования сигналов этих систем в данные, пригодные для навигации. Это проблема в области компьютерного зрения, и она является одной из основных в автономном полете БЛА [6].

Для непрерывного, устойчивого управления БЛА и повышения точности определения своих координат необходимо применять технологии высокоточного позиционирования, перспективного направления

в проектировании систем навигации и ориентации БЛА. С этой целью можно использовать навигационные модули, обеспечивающие относительную навигацию с дециметровой точностью, что наиболее актуально при движении нескольких БЛА в составе групп, выполнении совместных задач различными разнесенными объектами, осуществлении режимов посадки БЛА на необорудованные площадки. Применение навигационных технологий разработки помехозащищенных малогабаритных навигационных модулей, технологии высокоточного позиционирования, существенно повысит эффективность боевого применения беспилотных летательных аппаратов [7].

#### Библиографические ссылки

1. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/algorithmy-vychisleniya-polozheniya-i-orientatsii-bpla> (дата обращения: 04.09.2019).
2. Колосов К.С. Робастная комплексная обработка навигационных измерений БПЛА. *Inf. Процесс.* 2017. № 17. С. 245–257.
3. Лоскутников А. А., Сеньюшкин Н. С., Парамонов В. В. Системы автоматического управления БПЛА [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/32/3685/> (дата обращения: 04.09.2019).
4. Системы ориентации для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/c131-2011-4-16/sistemy-orientatsii-dlya-malorazmernykh-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov/> (дата обращения: 04.09.2019).
5. Андреев К. В. Оптимальные траектории для беспилотного летательного аппарата, отслеживающего движущиеся цели с использованием линейной антенной решетки // *Control Sci.* 2015. № 5. С. 76–84.
6. Канеллакис С., Николакопулос Г. Обзор компьютерного зрения для беспилотных летательных аппа-

ратов: текущие события и тенденции // *J. Intell. Robot. Syst.* 2017. № 87. С. 141–168.

7 Бабаков В.Н., Борсук О.А., Муравьев А.Б., Кнауэр Г.Э. Применение перспективных навигационных технологий в пилотажно-навигационной аппаратуре беспилотных летательных аппаратов. Коломна, 2016. С. 34–38.

#### References

1. Algorithms for calculating the position and orientation of the UAV [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/algorithmy-vychisleniya-polozheniya-i-orientatsii-bpla> (access: 09/04/2019).
2. Kolosov K. S. Robust integrated processing of UAV navigation measurements. *Inf. Process.* 2017. № 17. P. 245–257.
3. Loskutnikov A. A., Senyushkin N. S., Paramonov V. V. Automatic UAV control systems [Electronic resource]. URL: <https://moluch.ru/archive/32/3685/> (access: 04.09.2019).
4. Orientation systems for small unmanned aerial vehicles [Electronic resource]. URL: <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/c131-2011-4-16/sistemy-orientatsii-dlya-malorazmernykh-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov/> (access: 04.09.2019).
5. Andreev K. V. Optimal trajectories for an unmanned aerial vehicle tracking moving targets using a linear antenna array. *Control Sci.* 2015. № 5. P. 76–84.
6. Kanellakis S., Nikolakopoulos G. Computer vision review for unmanned aerial vehicles: current events and trends. *J. Intell. Robot. Syst.* 2017. № 87. P. 141–168.
7. Babakov V. N., Borsuk O. A., Muravyov A. B., Knauer G. E. Application of advanced navigation technologies in the flight-navigation equipment of unmanned aerial vehicles. *Kolomna*, 2016. P. 34–38.

© Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г.,  
Харлашина С. В., 2019

УДК 629.7.01

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. В. Власенко<sup>1</sup>, И. П. Рожков<sup>2</sup>, И. А. Клешнина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru

*Рассматривается процесс проектирования кронштейна с использованием топологической оптимизации, которая позволяет оперативно и относительно экономично находить наиболее оптимальный вид силовой конструкции.*

*Ключевые слова: проектирование летательных аппаратов, топологическая оптимизация, силовая конструкция, оптимизация конструкции, аддитивные технологии, технология послойного синтеза.*

## TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN AIRCRAFT DESIGNS

A. V. Vlasenko<sup>1</sup>, I. P. Rozhkov<sup>2</sup>, I. A. Kleshnina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru

*The article discusses the process of designing a bracket using topological optimization, which allows you to quickly and relatively economically find the most optimal form of power structure.*

*Keywords: aircraft design, topological optimization, power structure, structural optimization, additive technologies, layered synthesis technology.*

Традиционный подход к разработке конструкций, при котором ее оптимальность и время проектирования существенно зависит от опыта и квалификации инженера-конструктора, предполагает, что принципиальные схемы конструкции предлагаются разработчиком. При этом важнейшее значение имеют не только знания и умения конструктора, но и его креативность, интуиция, способность к творческому мышлению. Созданные варианты подвергаются проверочному расчету, на основе результатов которого происходит корректировка, модификация или создание принципиально новой конструкции [1].

Более современным подходом к проектированию является подход, при котором проводится топологическая оптимизация конструкции.

Топологическая оптимизация – это математический процесс поиска наиболее оптимальной силовой схемы конструкции, в пределах определенных граничных условий, направленный на уменьшение или увеличение заданного свойства (уменьшение материалоемкости, снижение энергии деформации, увеличение главной собственной частоты колебаний и др.) [2; 3].

Внедрению топологической оптимизации в процесс проектирования особенно способствуют современная электронно-вычислительная техника, решающая сложнейшие математические задачи оптимизации

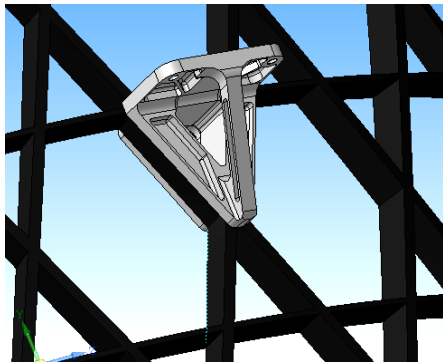
силовых элементов конструкции, и использование аддитивных технологий производства, благодаря которым существует возможность получать изделия практически любой формы.

Специализированные САПР-программы существенно упрощают работу инженера-конструктора, позволяя решать математические задачи прочностного расчета конструкции и виртуально моделировать физические процессы [3]. В результате получаемые информация и визуализированные физические явления представляются в удобном для зрительного наблюдения и анализа виде.

Примером применения топологической оптимизации при проектировании конструкций может служить решение задачи оптимизации кронштейна в программе ANSYS Mechanical. Данный кронштейн (см. рисунок) предназначен для крепления горизонтальной сотовой панели к силовой конструкции космического аппарата, которая представляет собой углепластиковую изогридную трубу. Целью проведения оптимизации является поиск варианта конструкции, обладающего наименьшей материалоемкостью и удовлетворяющего требованиям прочности, технологичности, ремонтнопригодности, собираемости и др.

На первом этапе проводилась постановка и решение задачи прочностного расчета конструкции кронштейна. Граничные условия прочностного расчета –

действующие нагрузки, контур геометрической области, в пределах которого должна располагаться конструкция, условия ее закрепления, материал кронштейна и его механические свойства.



Конструкция кронштейна, полученная после проведения оптимизации

Затем, полученная на основании целевой функции (снижение массы), конструкция анализировалась и проводилась ее дальнейшая оптимизация с учетом других критериев (технологичности, ремонтпригодности, собираемости). Для этого в программе дополнительно задавались требования по соблюдению линейности некоторых поверхностей, недопустимости наличия внутренних полостей и кривых выше третьего порядка.

Конечный результат с оптимизированной топологией анализировался и модернизировался, после чего проводился его проверочный расчет, позволяющий судить о работоспособности оптимизированной конструкции.

Применяя САПР-программы, пользователь должен понимать механизмы происходящих процессов оптимизации, а используемые им программы должны быть четко отлажены и стабильны [5].

Таким образом, топологическая оптимизация служит серьезным инструментом в руках инженера-конструктора, благодаря чему конструкция при условии удовлетворения основным требованиям обладает наилучшим комплексом свойств, при этом зачастую большая часть времени проектирования тратится не на разработку варианта силовой схемы, а на интерпретацию и анализ полученных результатов и дальнейшую проверку его оптимальности по другим критериям, когда конструктор на основании полученной графики, исходя из производственных возможностей предприятия, технологичности, ремонтпригодности, требований надежности и других критериев, утверждает конечный вид конструкции.

#### Библиографические ссылки

1. iQB technologies. Топологическая оптимизация геометрии изделия как путь повышения прибыльно-

сти предприятия [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization> (дата обращения: 29.08.2019).

2. Центр инженерно-физических расчетов и анализа. Топологическая оптимизация конструкций [Электронный ресурс]. URL: <https://multiphysics.ru/stati/novosti/topologicheskaiia-optimizatciia-konstruktcii-v-ansys-mechanical.htm> (дата обращения: 29.08.2019).

3. Математическое моделирование. Топологическая оптимизация [Электронный ресурс]. URL: <https://postnauka.ru/faq/84374> (дата обращения: 29.08.2019).

4. Habr. Обзор софта для топологической оптимизации и биологического дизайна [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/411999>(дата обращения: 29.08.2019).

5. ANSYS CLUB. Четыре основных ошибки при топологической оптимизации [Электронный ресурс]. URL: <https://cae-club.ru/publications/chetyre-osnovnyh-oshibki-pri-topologicheskoy-optimizacii> (дата обращения: 29.08.2019).

#### References

1. iQB technologies. Topologicheskaya optimizatsiya geometrii izdeliya kak put' povysheniya pribylnosti predpriyatiya [iQB technologies. Topological optimization of product geometry as a way to increase enterprise profitability] [Electronic resource]. URL: <https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization> (access: 29.08.2019).

2. Tsentr inzhenerno-fizicheskikh raschetov i analiza. Topologicheskaya optimizatsiya konstruktсий [Center for Engineering Physics Calculations and Analysis. Topological design optimization] [Electronic resource]. URL: <https://multiphysics.ru/stati/novosti/topologicheskaiia-optimizatciia-konstruktcii-v-ansys-mechanical.htm> (access: 29.08.2019).

3. Matematicheskoe modelirovanie. Topologicheskaya optimizatsiya [Math modeling. Topological optimization] [Electronic resource]. URL: <https://postnauka.ru/faq/84374> (access: 29.08.2019).

4. Habr. Obzor softa dlya topologicheskoy optimizatsii i biologicheskogo dizayna. [Habr. Software review for topological optimization and biological design] [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/411999> (access: 29.08.2019).

5. ANSYS CLUB. Chetyre osnovnykh oshibki pri topologicheskoy optimizatsii. [ANSYS CLUB. Four Major Mistakes in Topological Optimization] [Electronic resource]. URL: <https://cae-club.ru/publications/chetyre-osnovnyh-oshibki-pri-topologicheskoy-optimizacii> (access: 29.08.2019).

© Власенко А. В., Рожков И. П.,  
Клешнина И. А., 2019

УДК 629.78

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИССИЙ ПОЛЕТА НА ЛУНУ ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛУННОГО ГРУНТА

Е. С. Гордиенко\*, А. В. Симонов, П. А. Худорожков

АО «НПО Лавочкина»

Российская Федерация, 141400, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

\*E-mail: gordienko.evgeny@gmail.com

*Показано проектирование миссий полета к Луне и возвращение к Земле с целью доставки лунного грунта. Этапы анализа миссии включают в себя выбор наилучшей схемы перелета, анализ перелета от Земли к Луне и возвращения к Земле.*

*Ключевые слова: космический аппарат, прямой перелет, лунные траектории, полярная орбита, траектории возвращения.*

## FLIGHT MISSIONS TO THE MOON FOR DELIVERING LUNAR SOIL DESIGN

E. S. Gordienko\*, A. V. Simonov, P. A. Khudorozhkov

Lavochkin Association

24, Leningradskaya Str., Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation

\*E-mail: gordienko.evgeny@gmail.com

*Article includes flight mission to the Moon and return-trajectories to the Earth for delivering lunar soil desing. Mission analysis stages include choosing the best flight scheme, analyzing the flight from the Earth to the Moon and return back to the Earth.*

*Keywords: spacecraft, direct flight, lunar trajectories, polar orbit, return-trajectory.*

**Введение.** Рассматривается вопрос выбора рациональных траекторий полета КА от Земли к Луне и возвращения от Луны к Земле. КА стартует с космодрома «Восточный» и выводится на опорную околоземную орбиту, откуда разгонный блок переводит КА на траекторию перелета к Луне. При подлете к Луне выполняется одноимпульсное торможение для перевода КА на полярную круговую орбиту искусственного спутника Луны (ИСЛ) высотой 100 км. Далее формируется посадочная орбита с высотой перицентра 18 км, с которой происходит посадка КА на поверхность Луны. В расчетный момент времени, после выполнения всех возложенных на КА функций, происходит взлет КА с лунной поверхности и формирование низкой опорной орбиты ИСЛ высотой 100 км. Далее, после выдачи разгонного импульса, КА переводится на траекторию возвращения к Земле.

### **Анализ миссии по доставке образцов грунта с Луны.**

Анализ миссии проводится в четыре этапа.

На первом – рассматриваются возможные схемы перелета КА от Земли к Луне:

- прямого перелета от Земли к Луне [1–3];
- перелета через точку либрации  $L_1$  системы Земля – Луна [4];
- перелета с использованием двигателей малой тяги [5].

Критериям простоты и надежности реализации миссии отвечает схема прямого перелета от Земли к Луне с одноимпульсным торможением при переходе на конечную орбиту ИСЛ, а в качестве схемы обрат-

ного перелета - вариант старта с поверхности и формирования опорной орбиты вокруг Луны и затем прямого перелета от Луны к Земле. Все траектории отлета КА от Земли к Луне и возвращения КА с Луны на Землю проектируются для случая отлета через северную  $N$  полусферу мира, при этом разгонные импульсы отлета и тормозной импульс при подлете к Луне сообщаются при учете обеспечения видимости КА с российских наземных станций слежения. Дата и время посадки КА на поверхность Луны соответствуют началу лунного дня в точке посадки.

На втором этапе определяется траектория прямого перелета от Земли на полярную круговую орбиту ИСЛ высотой 100 км при учете ограничений на условия освещенности в точке посадки. Длительность перелета от Земли к Луне выбирается в диапазоне от 4 до 6 суток.

На третьем этапе проводится анализ траекторий взлета КА с поверхности Луны и формирования опорной полярной круговой орбиты ИСЛ с высотой 100 км. Использование схемы с опорной орбитой позволяет сформировать оптимальную траекторию перелета Луна-Земля, выведение на которую осуществляется тремя включениями двигательной установки. Первым и вторым включениями формируется опорная ОИСЛ, третьим включением – перелетная траектория.

На четвертом этапе определяется траектория возвращения к Земле, попадающая в точку на поверхности Земли с заданными угловыми координатами  $\varphi_c, \lambda_c$ . Длительность перелета от Луны к Земле рассматривается в диапазоне от 4,5 до 6,5 суток.

Критерием поиска наилучшего решения на втором, третьем и четвертом этапах является минимизация характеристической скорости КА на каждом из этапов. Для реализации миссии с 2024 по 2032 годы на торможение у Луны, посадку на ее поверхность, взлет с Луны и формирование траектории возвращения требуется запас характеристической скорости ~5680 м/с.

#### Библиографические ссылки

1. Гордиенко Е. С., Худорожков П. А. К вопросу выбора рациональной траектории полёта к Луне // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2016. № 1. С. 15–25.
2. Ивашкин В. В. Оптимизация космических манёвров при ограничениях на расстояния до планет. М. : Наука, 1975. 392 с.
3. Ивашкин В. В., Петухов В. Г. Траектории перелета с малой тягой между орбитами спутников Земли и Луны при использовании орбиты захвата Луной // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2008. № 81. 32 с.
4. Pavlak T. A., Howell K. C. Evolution of the out-of-lane amplitude for quasi-periodic trajectories in the Earth-Moon system // *Acta Astronautica*. 2012. № 81. P. 456–465.
5. Машиностроение. Энциклопедия / под ред. К. В. Фролова и др. М. : Машиностроение. Ракетно-

космическая техника, 2012. Т. IV-22, кн. 1. Гл. 2.6.1. 925 с.

#### References

1. Gordienko E. S., Khudorozhkov P. A. [To the question of choosing a rational flight trajectory to the Moon] // *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*. 2016. № 1. P. 15–25 (In Russ).
2. Ivashkin V. V. *Optimizacija kosmicheskikh manjovrov pri ogranichenijah na rasstojanija do planet*. [Space maneuvers optimization with restrictions on the distance to the planets]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 392 p.
3. Ivashkin V. V., Petukhov V. G. [Low thrust flight trajectories between the satellite orbits of the Earth and the Moon with using Moon capture orbit] // *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha*. 2008. 32 p.
4. Pavlak T. A., Howell K. C. Evolution of the out-of-lane amplitude for quasi-periodic trajectories in the Earth-Moon system // *Acta Astronautica*. 2012. № 81. P. 456–465.
5. Frolov K. V. *Mashinostroenie. Jenciklopedija*. [Engineering. Encyclopedia.]. Moscow, Mashinostroenie Publ. Aerospace engineering, 2012. Vol. IV-22, b. 1. ch. 2.6.1. 925 p.

© Гордиенко Е. С., Симонов А. В., Худорожков П. А., 2019

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М. А. Дремухин<sup>1</sup>, С. В. Мишин<sup>1</sup>, Р. А. Савельев<sup>1</sup>, Д. В. Гоголаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Политехнический институт «Сибирский федеральный университет»  
Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии»  
Российская Федерация, 662971, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
E-mail: d-max\_70@mail.ru

*Наземные антенные системы, как правило, имеют большие и тяжёлые рефлекторы, которые должны быть устойчивы к различным погодным факторам. Изготовление рефлектора из полимерных композиционных материалов позволит облегчить вес рефлектора, а также увеличить срок службы антенны.*

*Ключевые слова: рефлектор, полимерный композиционный материал, антенна, прочность.*

## PRODUCTION OF A REFLECTOR FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

M. A. Dremukhin<sup>1</sup>, S. V. Mishin<sup>1</sup>, R. A. Saveliev<sup>1</sup>, D. V. Gogulaev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Polytechnic Institute “Siberian Federal University”  
The Interinstitutional base Department “Applied Physics and Space Technologies”  
12a, Kirov Str., Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, 662971, Russian Federation  
E-mail: d-max\_70@mail.ru

*Terrestrial antenna systems, as a rule, have large and heavy reflectors, which must be resistant to various weather factors. The manufacture of the reflector from polymer composite materials will make it possible to lighten the weight of the reflector, as well as increase the life of the antenna.*

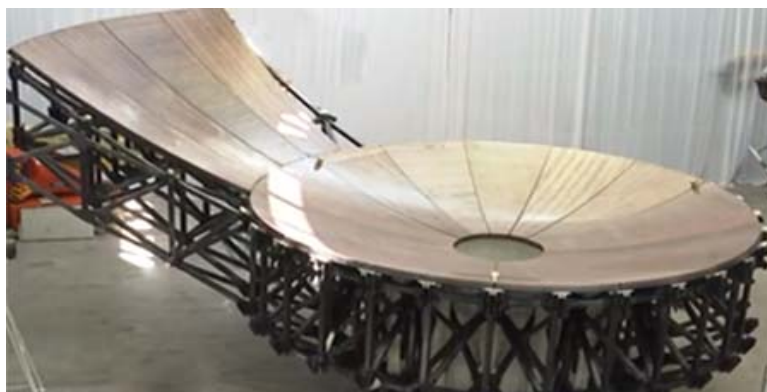
*Keywords: reflector, polymer composite material, antenna, strength.*

Наземная спутниковая система используется для приёма или передачи радиосигналов между наземными станциями и искусственными спутниками Земли. Наиболее сложным элементом спутниковой антенны является рефлектор, от качества выполнения которого, напрямую зависит работа всей антенной системы.

Требования, предъявляемые к наземным антенным системам, вынуждают прибегать к использованию самых современных конструкций, технологий и мате-

риалов. Для четкой передачи радиосигналов без помех и увеличения пропускной способности антенны при работе в Ka, Q-диапазонах, необходимо увеличивать диаметр антенн, что непосредственно ведет к увеличению массы рефлектора [1].

Таким образом, одной из актуальных задач в настоящее время становится разработка оптимальной конструкции и внедрение технологического процесса изготовления рефлектора из полимерных композитов (см. рисунок) [2].



Рефлектор из полимерных композитов

При изготовлении конструкции из композиционного материала совершенство технологии определяется выбором оптимальных параметров технологического процесса, техническим уровнем используемого оборудования и оснастки, наличием надежных методов неразрушающего контроля, как самой конструкции, так и полуфабрикатов для ее производства [3].

Полимеризация углепластиковой конструкции осуществляется методом вакуумной инфузии, выкладывается сухой углепластиковый материал на специальное технологическое приспособление, затем поверх формы надевается вакуумный мешок, чтобы обеспечить герметичность. Из мешка откачивается воздух, под воздействием отрицательного давления в заготовку подается связующий элемент. После завершения процесса пропитки связующее вещество твердеет, образуя жесткую полимерную матрицу [4; 5].

В связи с тем, что рефлектор будет изготовлен не из алюминия, как обычно, а из полимерных композитов, масса рефлектора станет легче, при этом рефлектор будет являться размеростабильным, что не мало важно, поскольку рабочий диапазон температур от минус  $-50$  до  $+50$  °С. Благодаря этим методам срок службы рефлекторов изготовленных из полимерных композитов станет больше.

#### Библиографические ссылки

1. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ / под ред. Г. З. йзенберга. В 2 ч. Ч. 1. М. : Связь, 1977. 288 с.
2. Способ изготовления рефлектора : пат. 2563198 Рос. Федерация: № 2013155354/08 ; заявл. 12.12.2013 ; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26. 6 с.

3. Воробей В. В., Маркин В. Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Новосибирск : Наука, 2006. 189 с.

4. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.

5. Ивановская О. В., Шевцова М. А. Производство изделий из полимерных композиционных материалов : учеб. пособие. Харьков : ХАИ, 2005. 84 с.

#### References

1. Ayzenberg G. Z., Yampol'skiy V. G., Tereshin O. N. Antenny UKV. [Ultrashort waves ntennas]. Moscow, Svyaz', 1977. 288 p.
2. Sposob izgotovlenija reflektora: pat. 2563198 Ros. Federacija: № 2013155354/08, zajavl. 12.12.2013 ; opubl. 20.09.2015, Bjul. № 26. 6 p.
3. Gardymov G. P., Meshkov E. V. et al. Kompozicionnye materialy v raketno-kosmicheskom apparatostroenii [Composite materials in space-rocket apparatus building] / ed. by. dr. techn. sci., professor G. P. Gardymov and dr. techn. sci., E. V. Meshkov. SPb. : SpecLit, 1999. 271 p.
4. Bataev A. A., Bataev V. A. Kompozitsionnye Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye. [Composite materials: structure, production, application]. Novosibirsk : publisher NGTU, 2002. 384 p.
5. Ivanovskaya O. V., Shevcova M. A. Proizvodstvo izdelij iz polimernyh kompozicionnyh Uchebnoe posobie po laboratornomu praktikumu materialov [Production of products from polymeric composite materials The manual on a laboratory practical work]. Har'kov : HAI, 2005. 84 p.

© Дремухин М. А., Мишин С. В., Савельев Р. А., Гоголаев Д. В., 2019



УДК 531.383

## ДЕМПФЕР СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. В. Ермаков

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс»  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в  
E-mail: info@polus-tomsk.ru

*Двигатель-маховик генерирует знакопеременные возмущающие моменты, которые через его посадочную плоскость передаются на конструкцию космического аппарата, а через нее могут оказывать негативное влияние на целевую аппаратуру. Способ снижения помеховых моментов – введение дополнительных средств виброзащиты целевой аппаратуры космического аппарата от виброактивности двигателя-маховика, которые условно можно разделить на активные и пассивные. Устранить недостатки подобных устройств предполагается на основе трабекулярных структур.*

*Ключевые слова: космический аппарат, двигатель-маховик, демпфер, помеховый момент, виброзащита.*

## DAMPER OF VIBRATION PROTECTION SYSTEM OF THE ENGINE-FLYWHEEL OF THE SPACECRAFT

D. V. Ermakov

Stock Company “Scientific & Industrial Centre “Polyus”  
56v, Kirov Str., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: info@polus-tomsk.ru

*Engine-flywheel generates the alternating molety that through his boarding the plane transmitted to a space vehicle design, and through it can have a negative impact on the target hardware. Method for reducing noise moments – vibration protection of the target equipment of the spacecraft from the vibration activity of the flywheel engine, which is divided into active and passive. It is supposed to eliminate the shortcomings of active and passive vibration protection devices on the basis of trabecular structures.*

*Keywords: spacecraft, engine-flywheel, damper, interference moment, vibroprotection.*

Управляющие двигатели-маховики (УДМ) предназначены для создания знакопеременных динамических моментов, прикладываемых к корпусу космического аппарата (КА), посредством которых осуществляется управление пространственной ориентацией КА и его стабилизация. Знакопеременные динамические (управляющие по отношению к КА) моменты создаются электродвигателем, вращающим маховик, установленный в подшипниках.

Однако помимо динамических моментов, УДМ генерирует знакопеременные возмущающие моменты, которые через посадочную плоскость УДМ передаются на конструкцию КА, а через нее могут оказывать негативное влияние на целевую аппаратуру [1]. Особенно остро данная проблема стоит для КА дистанционного зондирования Земли, где виброактивность УДМ может существенно ограничить информативные свойства снимков земной поверхности.

В КА научного назначения, например гравиметрических или астрофизических, из-за виброактивности УДМ невозможны точные научные исследования с приемлемым результатом.

Полностью устранить знакопеременные возмущающие моменты, генерируемые УДМ, нельзя. Их можно только ограничить до приемлемых для работы целевой аппаратуры КА значений двумя способами:

- снизить виброактивность УДМ;
- ввести виброзащиту целевой аппаратуры КА от виброактивности УДМ.

Основным источником вибраций в УДМ является ротор-маховик, вращающийся на подшипниках качения, интенсивность его вибраций зависит от факторов – остаточной неуравновешенности и близости рабочих скоростей к критическим значениям.

Имеется возможность ограничить виброактивность вновь разрабатываемых УДМ, что требует проведения проектно-конструкторских работ.

В случае поставки серийных УДМ кардинально доработать конструкцию нельзя. Поэтому остается только один путь снижения помеховых моментов – введение дополнительных средств виброзащиты целевой аппаратуры КА от виброактивности двигателя-маховика, условно их можно разделить на активные и пассивные [2; 3].

Активные средства виброзащиты предназначены для снижения перемещения во всем требуемом диапазоне частот, что обеспечивается наличием гасителей вибровоздействия с дополнительным источником энергии. Например, в состав системы активной виброзащиты, как правило, входят акселерометры для обнаружения и фиксации колебаний, микропроцессорные системы анализа колебаний и формирования

управляющих сигналов (блок управления), а также механизм реализации активной компенсации, генерирующий противофазные колебания – устройство компенсации. С помощью компенсирующих излучателей формируется дополнительное гасящее поле с требуемыми пространственными и частотными характеристиками. Наложение на исходное поле гасящего поля приводит к их взаимной компенсации. Анализ создания подобных систем показывает, что практически все они подчинены общей концепции – установке защищаемого устройства на виброзащитную платформу, т. е. между УДМ и КА.

Применение активных систем виброзащиты значительно увеличивает массогабаритные характеристики, энергопотребление и сложность конструкции, а соответственно и стоимость изделия. Более рациональным вариантом является использование пассивных систем защиты, основой которых являются упругие и демпфирующие элементы, такие как прокладки, демпферы, амортизаторы, дополнительные ребра жесткости и пр. Пассивные системы позволяют смягчить воздействие вибрации и погасить колебания. При этом существуют достаточная теоретическая база и наработки, которые подтверждают их надежность, эффективность и неприхотливость в эксплуатации. Среди недостатков пассивных систем можно отметить [4; 5]: отсутствие возможности изменить подавляемую частоту; сложность теплосъема с УДМ на термоплиту КА, поскольку теплосъем осуществляется через упругие элементы; большая масса устройств виброзащиты.

Устранить указанные недостатки возможно с помощью устройства виброзащиты, которое создано по аддитивной технологии и реализует метод динамического поглощения (демпфирования) на основе трабекулярных структур.

Трабекула – это небольшой элемент структуры в виде маленького пучка, стойки или стержня, который выполняет механическую функцию и воспринимает несущую нагрузку.

Через множество точек связи формируется объемное переплетение трабекул с оптимально подобранным соотношением количества дорожек прохождения вибрационного воздействия. При этом упругие свойства подобранной трабекулярной структуры тела демпфера зависят не только от применяемого материала, но и от ее пористости и от ориентации трабекул.

Варьируя геометрию трабекулярной структуры, можно осуществлять настройку резонансной частоты демпфера, управлять дорожкой прохождения вибрационных воздействий на стадии его проектирования и значительно повысить его функциональность.

С помощью традиционных методов механообработки конструкционных материалов нельзя выполнить трабекулярную структуру предлагаемого демпфера.

Одним из вариантов создания демпфера на основе трабекулярных структур является выполнение его 3D-модели в САПР и изготовление на 3D-принтере.

Демпфер – посадочная деталь УДМ на КА, а значит, так же воспринимает механические нагрузки во время запуска КА на орбиту, что и сам УДМ. Поэтому, кроме вибрационных воздействий со стороны по-

садочной плоскости УДМ на КА, демпферу необходимо выдерживать механические нагрузки во время выведении КА на орбиту.

Влияние приложенных сил на демпфер во время механических нагрузок значительно выше, чем вибрационные воздействия со стороны посадочной плоскости УДМ, поэтому в процессе моделирования демпфера необходимо найти баланс между стойкостью к механическим нагрузкам и способностью поглотить энергию циклического деформирования со стороны посадочной плоскости УДМ при его функционировании.

### Библиографические ссылки

1. Кузнецов Д. А., Ермаков В. Ю., Телепнев П. П. Предложение по решению проблемы виброзащиты прецизионной оптико-электронной аппаратуры космического аппарата «Спектр-УФ» // Вопросы электро-механики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 135, № 4. С. 17–20.
2. Вибрации в технике : справ. : в 6 т. / ред. В. Н. Челомей (пред). М. : Машиностроение, 1980. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. 1980. 544 с.
3. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. М. : Машиностроение, 1999. 344 с.
4. Самсаев Ю. А. Вибрации приборов с опорами качения. М. : Машиностроение, 1984. 128 с.
5. Никифоров А. Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник научно-технического развития. 2010. № 3(31). С. 31–53.

### References

1. Kuznetsov D. A., Ermakov V. Yu., Telepnev P. P. *Predlozheniye po resheniyu problemy vibrozashchity pretzionnoy optiko-eletonnoy apparatury kosmicheskogo apparata «Spektr-UF»* [Proposal for solving the problem of vibration protection of precision optical-electronic equipment of the Spectrum-UV spacecraft] // *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*. 2013. T. 135, № 4. P. 17–20.
2. *Vibratsii v tekhnike in 6 vol.* [Vibrations in technology]. Moscow, Mechanical Engineering, 1980. T. 3. Oscillations of machines, structures and their elements ed. F. M. Dimentberga i K. S. Kolesnikova. 1980. 544 p.
3. Goldin A. S. *Vibratsiya rotornykh mashin* [Vibration of rotary machines]. Moscow, Mechanical Engineering, 1999. 344 p.
4. Samsaev Yu. A. *Vibratsii priborov s oporami kacheniya.* [Vibration of devices with rolling bearings]. Moscow, Mechanical Engineering, 1984. 128 p.
5. Nikiforov A. N. *Problemy kolebaniy i dinamicheskoy ustoychivosti bystrovrashchayushchikhsya rotorov* [Problems of oscillations and dynamic stability of rapidly rotating rotors] // *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya.* 2010. № 3 (31). P. 31–53 (In Russ.).

© Ермаков Д. В., 2019

## ПОСТРОЕНИЕ АНИЗОГРИДНОЙ СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АДАПТЕРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. А. Замятин, В. В. Кольга

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: zamyatin.denis2011@yandex.ru

*Приведено описание конструкции адаптера для крепления космического аппарата к разгонному блоку ракеты-носителя.*

*Ключевые слова: космический аппарат, разгонный блок, ракета-носитель, метод конечных элементов.*

## BUILDING ANISOGRID SUPPORTING STRUCTURE OF THE SPACECRAFT ADAPTER

D. A. Zamyatin, V. V. Kolga

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: zamyatin.denis2011@yandex.ru

*The structure of adapter for mounting of spacecraft to the launch vehicle upper stage is described.*

*Keywords: spacecraft, upper stage, carrier rocket, finite element method.*

**Введение.** В настоящее время для крепления космических аппаратов (КА) к разгонным блокам, как правило, используются адаптеры анизогридной конструкции; основание адаптера геометрически представляет собой цилиндр или усечённый конус, на котором расположены либо крепёжные элементы для космического аппарата [1–3].

При разработке адаптера космического аппарата используется несколько программных пакетов, выбор которых осуществляется в зависимости от задачи того или иного этапа проектирования.

Для создания общих видов конструкции чертежей и наглядных моделей применяется система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks 2014 x64 Edition, позволяющая построить геометрическую модель с высокой степенью достоверности. Для предварительных расчётов анизогридной конструкции используется система конечно-элементного анализа COSMOS/M. С её помощью были получены предварительные результаты расчётов статических нагрузок, а также формы колебаний и потери устойчивости для первоначальной конструкции адаптера.

Для более точного построения, а также расчётов оптимизационного характера, целью которых является проектирование адаптера космического аппарата с наилучшим соотношением воспринимаемых нагрузок к массе несущей конструкции, используется САПР FEMAP v11.3.1 на базе решателя NX Nastran, обеспечивающего выполнение полного набора инженерных расчётов, включая расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС), собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, исследование нелинейных статических процессов, нелинейных динамических переходных процессов, анализ частотных характеристик, отклика на динамические воздействия [4].

Ниже приведены иллюстрации, демонстрирующие начальные этапы моделирования основных элементов анизогридной конструкции адаптера КА при помощи FEMAP v11.3.1.

Исходными данными для создания геометрической модели сетчатой структуры являются длина оболочки  $L$ , диаметр оболочки  $D$ , число спиральных ребер одного направления  $n$  и угол наклона спиральных ребер  $\varphi$ . Основой геометрической модели оболочки является типовой сегмент сетчатой структуры, показанный на рис. 1.

Положение типового сегмента с геометрическими параметрами  $s$  и  $l$  в глобальной системе координат определяется семью ключевыми точками, через которые проходят линии, имитирующие продольные оси спиральных и кольцевых ребер сетчатой структуры. Выполненные построения являются основой геометрической модели, которая используется для формирования конечно-элементной (КЭ) модели сетчатой структуры. Сетчатая цилиндрическая оболочка рассматривается как пространственная рама. Для её моделирования используется прямолинейный балочный КЭ, имеющий прямоугольное поперечное сечение и связанный с локальной системой координат (рис. 2).

Типовой сегмент сетчатой структуры разбивается на конечные элементы, имеющие единую ключевую точку  $P_3$ , которая располагается на продольной оси тела вращения в плоскости кольцевого ребра. Такое положение ключевой точки  $P_3$  позволяет с максимальной достоверностью описывать геометрию реальной сетчатой структуры, спиральные ребра которой имеют естественное закручивание. Очевидно, что чем меньше продольный размер прямолинейного конечного элемента, тем точнее аппроксимируется кривизна и кручение криволинейных ребер.

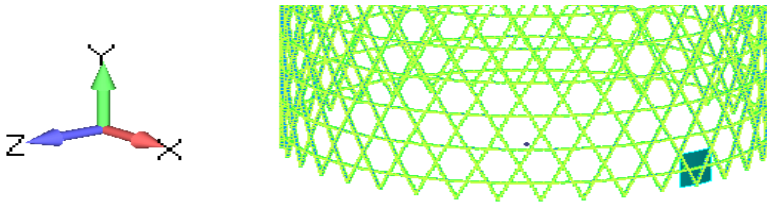


Рис. 1. Модель анизотридной конструкции адаптера (фрагмент), выделен типовой сегмент сетчатой структуры

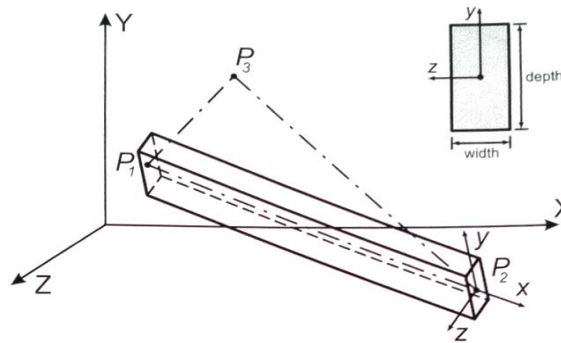


Рис. 2. Прямолинейный конечный элемент

С помощью типового сегмента, разбитого на конечные элементы, формируется конечно-элементная модель сетчатой анизотридной оболочки. Для этого используются элементарные операции копирования, вращения и переноса. Затем в конечно-элементной модели оболочки определяются требуемые характеристики рёбер. Это размеры поперечных сечений, модули упругости и плотности материалов спиральных и кольцевых рёбер. Геометрические и упругие параметры кольцевых рёбер, расположенных на краях оболочки, могут отличаться от соответствующих параметров кольцевых рёбер основной сетчатой структуры, то позволяет имитировать установку торцевых шпангоутов, через которые оболочка нагружается усилиями и моментами [5].

#### Библиографические ссылки

1. Адаптер и способ его изготовления [Электронный ресурс]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2209162.html> (дата обращения: 14.04.2018).
2. Замятин Д. А., Кольга В. В., Нестеров В. А. Проектирование адаптера космического аппарата информационного обеспечения // Решетневские чтения [Электронный ресурс] : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (12–16 нояб. 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 1.
3. Замятин Д. А., Богданова В. С., Степанова С. В. Концепция независимой спутниковой компьютерной сети // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию кафедры «Вычислительная техника» и 30-летию кафедры «Системы автоматизированного

проектирования» (22–24 ноября 2017, г. Пенза). Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. 420 с.

4. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. М. : ДМК Пресс, 2011. 34 с.

5. COSMOS/M: Finite Element Analysis System. COSMOS/M Basic System User Guide. USA, CA, LA, SRAC, 2002. 222 с.

#### References

1. Adapter i sposob ego izgotovleniya [Adapter and method of its manufacture] [Electronic resource]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2209162.html> (access: 14.04.2018).
2. Zamyatin D. A., Kolga V. V., Nesterov V. A. The designing of the adapter for information support spacecraft // Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf. (12–16 noyabrya 2018, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch., chast' 1 / pod obshh. red. Yu. Yu. Loginova. [Reshetnev reading: proceedings of the XXII Intern. scientific. conf. (12–16 November 2018, Krasnoyarsk) : 2 T. P. 1 / under the General ed. Yu. Loginov]. Krasnoyarsk, 2018 (in Russ.).
3. Zamyatin D. A., Bogdanova V. S., Stepanova S. V. The concept of independent orbital computer network // New information technologies and systems : proceedings of the XIV Intern. scientific. conf (22–24 November 2017, Penza). Penza, 2017. 420 p (in Russ.).
4. Danilov Yu., Artamonov I. Prakticheskoe ispol'zovanie NX [Practical use of NX]. Moscow, DMK Press. 2011. 34 p. (in Russ.).
5. COSMOS/M: Finite Element Analysis System. COSMOS/M Basic System User Guide. USA, CA, LA, SRAC, 2002. 222 p.

© Замятин Д. А., Кольга В. В., 2019

## ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ КРАН ГИБКОЙ ПОДВЕСКИ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Карманова, С. В. Мишин, Р. А. Савельев, Д. В. Гоголаев

Политехнический институт «Сибирский федеральный университет»  
Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии»  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
E-mail: anushta96@yandex.ru

*Исследуется трехточечный кран гибкой подвески для перемещения космических аппаратов. Основной задачей является анализ рабочего процесса трехточечного крана гибкой подвески.*

*Ключевые слова: кран гибкой подвески, космический аппарат, математическая модель, анализ.*

## THREE-POINT THE FLEXIBLE SUSPENSION CRANE TO MOVE THE SPACECRAFT

A. V. Karmanova, S. V. Mishin, R. A. Saveliev, D. V. Gogulaev

Polytechnic Institute "Siberian Federal University"  
The interinstitutional base Department "Applied Physics and Space Technology"  
12a, Kirov Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, Russian Federation, 662971  
E-mail: anushta96@yandex.ru

*This article is devoted to the study of three-point crane flexible suspension for moving spacecraft. The main task is to analyze the workflow of the three-point flexible suspension crane.*

*Keywords: flexible suspension crane, spacecraft, mathematical model, analysis.*

Механизация погрузочно-разгрузочных работ и транспортирования космических аппаратов (КА) во многих случаях осуществляется с помощью грузоподъемных кранов разных типов таких, как стрелковые, мостовые и кабельные (кран гибкой подвески), при этом на КА действуют различные механические нагрузки. Эти нагрузки зависят от разных внешних механических воздействий: статических, вибрационных, ударных, которые действуют на транспортное средство. Для перемещения КА необходимо учитывать предельные значения нагрузок, продолжительность воздействия и жесткостные характеристики системы, действующие на КА. Все характеристики должны соответствовать прочности при перемещении КА. Для этой цели наиболее эффективными являются Краны с гибкой подвеской (КГП). Классический КГП является грузоподъемной машиной, состоящая из двух опорных башен, между которыми перемещается грузовая тележка по натянутому несущему канату, с помощью этого каната перемещается грузовая тележка. Поэтому для оптимизации траектории перемещаемого груза используют КГП. Совершенствование технологических процессов КГП, является актуальным для повышения производительности, безопасности эксплуатации, снижения энергозатрат.

В СФУ был произведен анализ различных видов подъемно-разгрузочных машин. В ходе анализа, был рассмотрен трехточечный КГП. Одно из условий планирования рабочего процесса трехточечного

крана гибкой подвески, является решение систем уравнений

$$\begin{cases} (x_d - x_a)^2 + (y_d - y_a)^2 + (z_d - z_a)^2 = R_{1d}^2, \\ (x_d - x_b)^2 + (y_d - y_b)^2 + (z_d - z_b)^2 = R_{2d}^2, \\ (x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2 + (z_d - z_c)^2 = R_{3d}^2, \\ (x_m - x_a)^2 + (y_m - y_a)^2 + (z_m - z_a)^2 = R_{1m}^2, \\ (x_m - x_b)^2 + (y_m - y_b)^2 + (z_m - z_b)^2 = R_{2m}^2, \\ (x_m - x_c)^2 + (y_m - y_c)^2 + (z_m - z_c)^2 = R_{3m}^2, \\ \Delta_1 = R_{1d}^2 - R_{1m}^2, \\ \Delta_2 = R_{2d}^2 - R_{2m}^2, \\ \Delta_3 = R_{3d}^2 - R_{3m}^2. \end{cases}$$

Для осуществления перемещения лебедки, необходимо решение уравнений, в результате которых мы получили разницу длины подвеса, что позволяет осуществить перемещение лебедки. Точность перемещения определяется коэффициентом передачи лебедок и минимальным углом перемещения электроприводов. Эта математическая модель позволяет рассчитать перемещение электропривода для каждой координаты, также позволяет минимизировать временные и энергетические затраты. Также одним из условий планирования рабочего процесса трехточечного крана гибкой подвески для перемещения КА, является расчет на прочность системы.

В данной работе был исследован трехточечный крана гибкой подвески. КГП содержит три мачты и три лебедки, которые позволяют транспортировать КА в нужную область перемещения, которая представляет собой треугольную призму. Рассчитанная математическая модель управления КГП, основывается на системе линейных уравнений сфер. Решение уравнения позволяет получить длины перемещения КА по нужной траектории, которые позволяют рассчитать перемещение электропривода для каждой координаты. Эти расчеты позволяют получить экспе-

риментальные характеристики для управления КГП с учетом нелинейности. При рассмотрении математической и имитационной модели КГП, можно учитывать нелинейные упругие деформации: мачт, тросов и механических элементов. Учет упругих деформаций позволят увеличить точность позиционирования органа и минимизацию этапов расчета и воздействия на КА.

© Карманова А. В., Мишин С. В.,  
Савельев Р. А., Гоголаев Д. В., 2019

**АЛГОРИТМ ОДНОПЛОСКОСТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ ЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛИ  
КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ДОСТИЖЕНИЯ  
МИНИМАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ГЦОИ**

А. В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забабахина  
Российская Федерация, 456770, г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245  
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

*Рассмотрен алгоритм балансировочного расчёта, проводимого при уравнивании летающей модели в одной плоскости коррекции на вертикальном динамическом балансировочном стенде, обеспечивающий приведение параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам с оптимизацией по критерию достижения минимального угла отклонения продольной главной центральной оси инерции от оси симметрии модели, либо диагностирование невозможности для указанных параметров.*

*Ключевые слова: ось симметрии, ось инерции, центр масс, плоскость коррекции, дисбаланс, вектор, балансировочный расчёт.*

**THE ALGORITHM OF SINGLE-PLANE DYNAMIC BALANCING  
OF A CONICAL FLYING PROTOTYPE WITH OPTIMIZATION BY CRITERIA  
OF ACHIEVE THE MINIMUM DEVIATION OF MAIN CENTRAL AXIS OF INERTIA**

A. V. Klyuchnikov

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute of Technical Physics  
named after academician E. I. Zababakhin  
P/b 245, 13, Vassilyeva Str., Snezhinsk, 456770, Russian Federation  
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

*In the paper the algorithm of balancing calculation, which makes during the process of counterbalancing a flying model in only one correction flatness on a vertical dynamic balancing machine, is considered. The algorithm ensures setting of mass-inertia asymmetry parameters to fix standards with optimization by criteria of achievement of minimal angle between model's symmetry axis and axis of inertia. The algorithm ensures this setting of mass-inertia parameters during only one counterbalancing step. In a different way the algorithm gives the diagnosis about impossibility to set the mass-inertia asymmetry parameters.*

*Keywords: symmetry axis, axis of inertia, center of mass, plane of correction, unbalance, vector, balancing analysis.*

Одним из условий движения летающей модели (ЛМ) с заданной точностью по расчётной траектории, а также надёжного функционирования бортовой аппаратуры является определение и приведение к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на модель предельно-допустимых значений параметров массо-инерционной асимметрии, существенно влияющих на её лётно-технические характеристики, на завершающем этапе общей сборки. Уравнивание летающей модели выполняют на завершающем этапе общей сборки модели с использованием специализированного контрольно-измерительного оборудования. К числу указанных параметров массо-инерционной асимметрии относится величина поперечного смещения центра масс с геометрической оси (являющейся осью симметрии наружной поверхности) и угол отклонения продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно той же оси [1; 2].

В работах [2; 3] отмечается, что в последнее время для определения параметров массо-инерционной асимметрии ЛМ наметилась тенденция к использованию методов и средств динамической балансировки, что обусловлено высокими характеристиками точности динамических балансировочных станков (стендов). В работах [2; 4] приведено описание низкочастотного вертикального динамического балансировочного стенда с газовыми опорами, спроектированного и изготовленного для прецизионной балансировки ЛМ конической формы, обладающих единственной плоскостью коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модели. Балансировка ЛМ проводится в составе сборного ротора, с использованием специализированного технологического переходника, материализующего вторую (нижнюю) плоскость коррекции, а контролируемая модель устанавливается и фиксируется внутри переходника вертикально, носком вниз.

На практике операторы-балансировщики обычно стремятся достичь минимального значения поперечного смещения центра масс, обеспечивая при этом допустимое по документации на модель значение угла перекоса продольной ГЦОИ. Описание способа и методики одноплоскостной балансировки конической ЛМ, обеспечивающих (за один шаг балансировки) по результатам измерений дисбалансов в двух плоскостях коррекции определение массы и углового положения балансировочного груза, прикрепление которого к штатной плоскости коррекции модели, расположенной вблизи торца, приведение обоих параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам с оптимизацией по критерию достижения минимального поперечного смещения центра масс, либо доказательство невозможности одновременного обеспечения обоих контролируемых параметров (в этом случае балансировка завершается, а модель направляется изготовителю на перекомпоновку) приведено в [5–7]. В качестве верхней плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции ЛМ, конструктивно расположенная вблизи торца модели.

Однако существуют ЛМ, в том числе, длинномерные, обладающие конической формой, для обеспечения динамической устойчивости и, соответственно, эффективности эксплуатации которых более предпочтительным является устранение (в идеале) или минимизация именно перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси, естественно, при одновременном выполнении норматива по величине поперечного смещения центра масс. Предлагаемый расчётный алгоритм приведения параметров массо-инерционной асимметрии ЛМ к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на модель предельно-допустимых значений, с оптимизацией по критерию достижения минимального угла отклонения продольной ГЦОИ от геометрической оси, предполагает после определения значений и угловых положений начальных дисбалансов, действующих в верхней и нижней плоскостях коррекции выполнение следующих действий:

– сначала моделируют перевод ЛМ в состояние квазистатической неуравновешенности, когда геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются, но не в центре масс. Для этого моделируют появление компенсирующего дисбаланса в штатной плоскости коррекции, исключающего действие начального дисбаланса в этой плоскости коррекции. Перевод ЛМ в состояние квазистатической неуравновешенности позволяет в дальнейших расчётах оперировать исключительно коллинеарными векторами дисбалансов, моделируемыми в противоположных плоскостях коррекции, что упрощает проведение расчётов;

– затем с учетом коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют появление корректирующего дисбаланса в штатной плоскости коррекции, обеспечивающего приведение продольной ГЦОИ в параллельное геометрической оси положение. Рассчитывают предполагаемое значение смещения центра масс с геометрической оси. В случае если это значение не превышает предельно-допустимого значения, рассчитывают параметры балансировочного

дисбаланса как векторную сумму компенсирующего и корректирующего дисбалансов, и по законам статики определяют массу и угловое положение балансировочного груза. А если превышает, то рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемой ЛМ) значение угла перекоса продольной ГЦОИ, задавая значение поперечного смещения центра масс равным предельно-допустимому значению. Если предполагаемый угол не превышает предельно-допустимого значения, то рассчитывают параметры балансировочного дисбаланса и балансировочного груза. В ином случае балансировку прекращают, а ЛМ отправляют изготовителю на перекомпоновку;

– после прикрепления балансировочного груза к штатной плоскости коррекции, проводят контрольный цикл измерений с определением значений остаточных дисбалансов и параметров массо-инерционной асимметрии ЛМ и судят о качестве балансировки путем сопоставления остаточных и заданных предельно-допустимых значений параметров массо-инерционной асимметрии

Рассмотренный способ балансировки в единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс конической ЛМ и алгоритм проведения балансировочного расчёта обеспечивают исключение перекоса продольной ГЦОИ или, по крайней мере, достижение минимального угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ЛМ. При превышении хотя бы одним из начальных параметров массо-инерционной асимметрии заданного предельно-допустимого значения, расчётным путём выполняется подтверждение или опровержение возможности достижения значений параметров массо-инерционной асимметрии, не превышающих предельно-допустимых значений. Точность приведения контролируемых параметров асимметрии к заданным нормативам обеспечивается точностью измерений сигналов дисбалансов [4; 8]. При уравнивании ЛМ исключается необходимость осуществления дополнительных шагов балансировки, что позволяет сократить общее время балансировочного эксперимента. Экспериментальное опробование рассмотренного алгоритма и способа балансировки, проведённое на вертикальном балансировочном стенде с коническими газовыми опорами, подтвердило его высокую точность и эффективность.

#### Библиографические ссылки

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
2. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей / В. В. Ильиных, А. В. Ключников, А. В. Лысых и др. // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 191–196.
3. Андреев С. В., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф. Перспективы применения метода динамической балансировки для определения параметров асимметрии масс летательного аппарата // Решетнёвские чтения :



труды XVIII Междунар. науч. конф. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 8–10.

4. Стенд для прецизионной бесконтактной балансировки конических роторов в динамическом режиме / Н. А. Абышев, А. В. Ключников, Е. Ф. Михайлов, М. С. Чертков // Надежность и качество : труды 19 междунар. симпозиума. Пенза, 2014. Т. 2. С. 234–236.

5. Ключников А. В. Развитие и совершенствование алгоритма одноплоскостной балансировки в динамическом режиме высокоскоростной летающей модели // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 411–416.

6. Ключников А. В. Численный алгоритм оптимизации процесса уравнивания конической летающей модели на динамическом балансировочном стенде // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 2. С. 309–317.

7. Пат. РФ №2499985. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / А. В. Ключников ; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.

8. Ключников А. В. Обработка измерительных сигналов в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Вестник воздушно-космической обороны. М., 2019. № 1 (21). С. 86–92.

### References

1. Pravdin V. M., Shanin A. P. *Ballistika neupravlyaemih letatelnykh apparatov* [Ballistics of uncontrollable flying machines]. Snezhinsk, RFNC-VNIITF Publ., 1999, 496 p.

2. Technological support of quality during the manufacture of hypersonic uncontrollable flying models / V. V. Ilinykh, A. V. Klyuchnikov, A. V. Lysykh et al. // *Vestnik SibGAU*. 2013. Vol. 49, № 3. P. 191–196 (In Russ.).

3. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Mikhailov E. F. *Prospects of application of dynamic counterbalancing method for testing of flying machine's mass-inertia asymmetry parameters* [Perspectivy primeneniya metoda

dinamicheskoy balansirovki dlya opredeleniya parametrov asimmetrii mass letatel'nogo apparata] // *Reshetnevskie chteniia : Trudy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Proc. 18<sup>th</sup> Int. Technol. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014. Part 1. P. 8–10 (In Russ.).

4. Measuring stand for high accurate non-contacted counterbalancing of conical rotors in the process of dynamic regime [Stend dlya pretsizionnoi beskontaktnoi balansirovki konicheskikh rotorov v dinamicheskom rezhime] / N. A. Abyshev, A. V. Klyuchnikov, E. F. Mikhailov, M. S. Chertkov // *Nadyozhnost i kachestvo : trudy XIX Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Proc. 19<sup>th</sup> Int. Technol. Symp. "Reliability & Quality"]. Penza, 2014. Т. 2. P. 234–236 (In Russ.).

5. Klyuchnikov A. V. [Razvitiye i sovershenstvovaniye algoritma odnoploskostnoy balansirovki v dinamicheskom rezhime letayushchey modeli] // *Vestnik SibGAU*. 2015. Т. 16, № 2. P. 411–416 (In Russ.).

6. Klyuchnikov A. V. [Chislennyi algoritm optimizatsii protsessu uravnoveshivaniya konicheskoi letayushchei modeli na dinamicheskom balansirovochnom stende] // *Vestnik SibGAU*. 2016. Т. 17, № 2. P. 309–317 (In Russ.).

7. Klyuchnikov A. V. *Sposob balansirovki rotora v odnoy ploskosti korrektsii* [Method of rotor's counterbalancing in singular place for correction]. Patent RF, № 2499985, 2007.

8. Klyuchnikov A. V. Measuring signals processing during of flying vehicle's dynamic counterbalancing [Obработка izmeritelnykh signalov v protsesse dinamicheskoi balansirovki letatel'nogo apparata] // *Vestnik vozduschno-kosmicheskoi oboroni*. 2019. № 1 (21). P. 86–92 (In Russ.).

© Ключников А. В., 2019

УДК 629.7

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ГРУППОВОГО ПУСКА\*

А. П. Леонгард, З. А. Казанцев

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

*Рассматривается новая концепция космического аппарата предназначенного для выведения на низкие околоземные орбиты. Космический аппарат предназначен для формирования спутниковых систем при групповом запуске спутников одним ракетоносителем.*

*Ключевые слова: космический аппарат, групповой запуск.*

## DEVELOPMENT OF THE SPACECRAFT CONCEPT FOR GROUP START

A. P. Leongard, Z. A. Kazancev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: popovaannapavlovna@mail.ru

*The paper considers a new concept of spacecraft. The spacecraft is designed to be launched into low earth orbit. The spacecraft is designed for the formation of satellite systems during the launch of satellites by a single launch vehicle.*

*Keywords: spacecraft, satellite systems.*

В настоящее время имеется значительное число различных типов КА, предназначенных для решения крупных научных и других задач в ближнем и дальнем космосе: для исследования Луны, Солнца, планет, природных ресурсов Земли и т. д. [1]

В последнее время существенно изменились приоритеты в разработке космических аппаратов, предпочтение отдается малым космическим аппаратам. Основными преимуществами малого космического аппарата является малая стоимость, высокая технологичность, возможность оперативной модификации под конкретные цели, малое время изготовления, возможность быстрого запуска.

В работе рассматривается концепция конструктивно-компоновочной и силовой схемы космического аппарата для выведения на низкие околоземные орбиты.

Корпус космического аппарата представляет собой составную конструкцию, состоящую из трехслойных панелей и композитных стержней жестко соединённых между собой.

Основными размерами являются высота КА  $L = 1$  м и диаметр корпуса  $d = 1,8$  м. Космический аппарат в транспортном и рабочем положении представлен на рис. 1.

Вертикальные трехслойные панели предназначены для обеспечения жесткости конструкции и размещения на них дополнительной аппаратуры.

Пакет панелей солнечной батареи представляет собой два крыла, симметрично расположенных относительно друг друга. Каждое крыло состоит из штанги и четырех панелей. Штанга и панели соединены между собой шарнирными узлами. В транспортном положении крылья солнечной батареи крепятся вдоль корпуса изделия и удерживаются на корпусе космического аппарата по четырем углам. На верхней и нижней наружных поверхностях корпуса КА также размещены фотопреобразователи.

В связи с малыми размерами космического аппарата в составе полезной нагрузки предполагается использование сверхлегкого гибкого параболического трансформируемого рефлектора [2].

Космический аппарат предназначен для формирования спутниковых систем при групповом запуске спутников одним ракетоносителем. Космические аппараты расположены под обтекателем по схеме «тандем». Схема установки представлена на рис. 2.

Закрепление КА на адаптере и между собой осуществляется посредством пирозамков. Пирозамки установлены внутри опор из состава силовой схемы КА.

\*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по федеральному целевому проекту, соглашение № 14.575.21.0144.

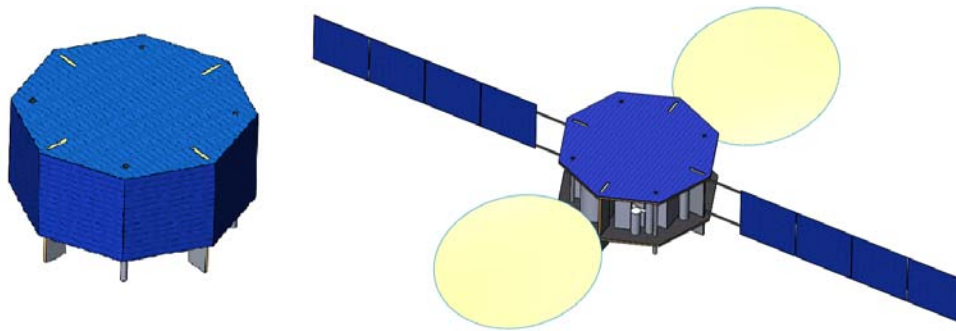


Рис. 1. Космический аппарат в транспортном и рабочем положении

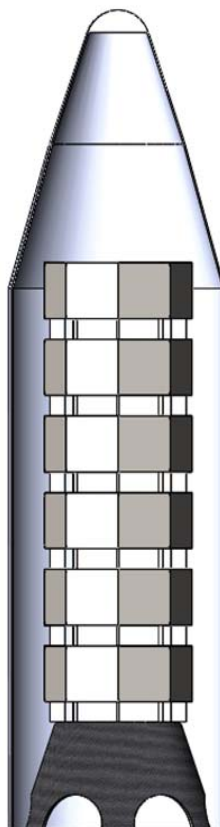


Рис. 2. Схема установки космических аппаратов под головным обтекателем

При подаче сигнала, происходит разделение стыка. Под действием пружинных толкателей космические аппараты отделяются.

#### Библиографические ссылки

1. Гущин В. Н., Панпаратов Б. М., Родионов А. Д. Основы устройства и конструирования космических аппаратов : учеб. пособие для вузов. М. : Машиностроение, 1992. 256 с.
2. Пат. 190518/U1 Российская Федерация. Параболический прямофокусный трансформируемый рефлектор / Лопатин А. В., Казанцев З. А., Масловская А. М. ; № 2019106900 ; заявл. 11.03.2019, опубл. 03.07.2019, Бюл. № 19, 10 с.

#### References

1. Gushchin V. N., Panparatov B. M., Rodionov A. D. *Osnovy ustrojstva i konstruirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Basics of spacecraft design and construction]: ucheb. posob. dlya vuzov. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 256 p.
2. Pat. 190518/U1 Rossijskaya Federaciya. *Parabolicheskij pryamofokusnyj transformiruemyj reflektor* [Transformable axial-symmetric parabolic reflector] / Lopatin A. V., Kazancev Z. A., Maslovskaya A. M. № 2019106900 ; zavavl. 11.03.2019, opubl. 03.07.2019, Byul. № 19, 10 p.

© Леонгард А. П., Казанцев З. А., 2019

УДК 621.396.931

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ В ТОЧКАХ ЛИБРАЦИИ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ–ЛУНА

С. Н. Леонов\*, П. В. Семкин, А. С. Кудряшов, Ю. С. Бессмертная, А. А. Внуков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: leonovsn@bk.ru

*Приведен анализ и проведена предварительная оценка возможности использования КА-ретрансляторов в точках либрации системы Земля–Луна с целью определения возможных зон радиовидимости на поверхности Луны и в окололунном пространстве.*

*Ключевые слова: космический аппарат, система Земля–Луна, точки Лагранжа, ретранслятор, радиосигнал.*

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SPACECRAFT TRANSPONDERS IN THE LIBRATION POINTS OF THE EARTH–MOON SYSTEM

S. N. Leonov\*, P. V. Semkin, A. S. Kudryashov, J. S. Bessmertnaya, A. A. Vnukov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\*E-mail: leonovsn@bk.ru

*In The abstracts, an analysis is given and a preliminary assessment is made of the possibility of using spacecraft repeaters at the libration points of the Earth–Moon system in order to determine possible radio-visibility zones on the lunar surface and in lunar space.*

*Keywords: spacecraft, the Earth–Moon system, Lagrange points, repeater, radio signal.*

Точки Лагранжа – точки в системе из двух массивных тел, в которых третье тело с пренебрежимо малой массой, не испытывающее воздействия никаких других сил, кроме гравитационных, со стороны двух первых тел, может оставаться неподвижным относительно этих тел [2]. Точки Лагранжа представляют собой частный случай решения ограниченной задачи трёх тел, представленный на рис. 1 [1].

Практическое значение имеют точки L1 и L2, поскольку расстояние между ними и Луной мало по сравнению с расстоянием от Луны до остальных точек Лагранжа.

Расчётное расстояние от центра Луны до точки L1 составляет 58019 км, как показано на рис. 2, а расстояние до точки L2 – 64536 км, как показано на рис. 3.

Для задач обеспечения непрерывной связи между Землёй и аппаратами окололунных и налунных миссий лучше всего подходят гало-орбиты [3]. Их форма позволяет обеспечить круглосуточную видимость КА связи с Земли при помощи одного спутника-ретранслятора, даже при размещении такого КА в точке L2.

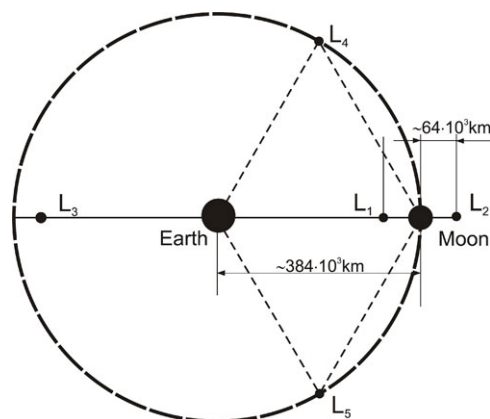


Рис. 1. Расположение точек Лагранжа системы Земля–Луна

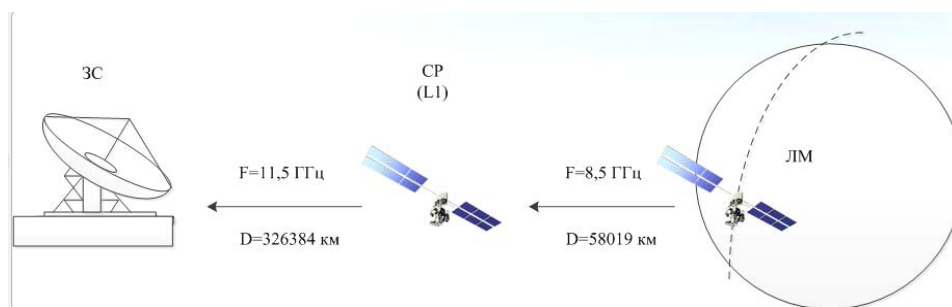


Рис. 2. Обобщённая структурная схема КС с ретрансляцией в точке Лагранжа L1

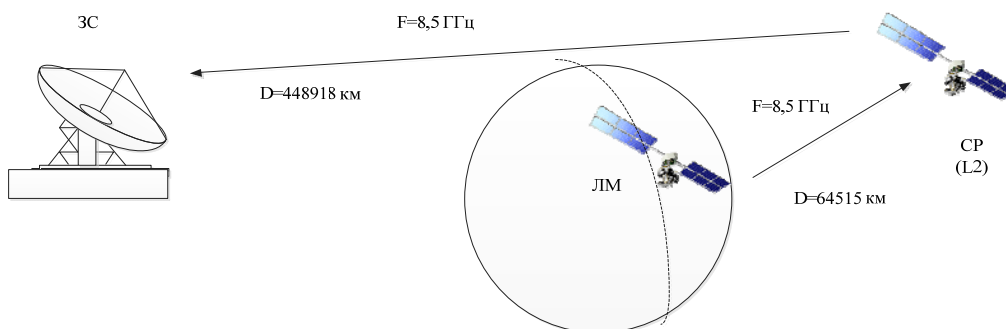


Рис. 3. Обобщенная структурная схема КС с ретрансляцией в точке Лагранжа L2

Расстояние от Земли до точек либрации системы Земля–Луна меняется с периодом 27,3 суток:

- а) точка L1 от 298000 до 349000 км;
- б) точка L2 от 421000 до 471000 км.

Все точки Лагранжа системы Земля–Луна расположены в плоскости орбиты Луны и вместе с плоскостью орбиты Луны эволюционируют по наклонению (относительно плоскости экватора Земли) от  $18^\circ$  до  $28,5^\circ$  с периодом колебаний  $\sim 18$  лет [4]. С тем же периодом эволюционирует наклонение плоскости орбиты Луны относительно эклиптики (с амплитудой  $\pm 5^\circ$ ).

Для задач обеспечения непрерывной связи между Землёй и аппаратами окололунных и налунных миссий лучше всего подходят гало-орбиты [5]. Их форма позволяет обеспечить круглосуточную видимость КА-ретранслятора с Земли даже при размещении такого КА в точке L2. Кроме того, КА на гало-орбите в точке L2 удобен для организации оперативной ретрансляции радиосигнала с объектов, находящихся на поверхности обратной стороны Луны.

По предварительным оценкам, для обеспечения круглосуточной радиовидимости обратной стороны Луны и окололунных орбит достаточно одного КА-ретранслятора, размещённого в точке Лагранжа L2 системы Земля–Луна. В случае отсутствия необходимости работать с абонентами на поверхности обратной стороны Луны, с точки зрения минимизации энергетики радиолинии КА–Земля, предпочтительным является вариант с размещением КА в точке Лагранжа L1, при этом будет сохраняться радиовидимость объектов на окололунных орбитах. Затраты рабочего тела на поддержание орбиты определяются амплитудами колебания КА на гало-орбите и могут быть оценены только после определения параметров орбит абонентов (лунных миссий).

#### Библиографические ссылки

1. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. Кн. 1. М. : Техносфера, 2015. 696 с.
2. Маркеев А. П. Точки либраций в небесной механике и космодинамике. М. : Наука, 1978. 312 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. М. : Вильямс, 2003. 1104 с.
4. Спутниковые системы связи и вещания (справочно-аналитическое издание). № 1. М. : Радиотехника, 2008. 384 с.
5. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. 487 с.

#### References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. Kosmicheskaya elektronika. Kn. 1. Moscow, Tekhnosfera, 2015. 696 p.
2. Markeev A. P. Tochki libracij v nebesnoj mekhanike i kosmodinamike. Moscow, Nauka, 1978. 312 p.
3. Sklyar B. Cifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye : per. s angl. 2-e izd., ispr. Moscow, Vil'yams, 2003. 1104 p.
4. Sputnikovye sistemy svyazi i veshchaniya (spravochno-analiticheskoe izdanie). № 1. Moscow, Radiotekhnika, 2008. 384 p.
5. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informacionnogo obespecheniya. Krasnoyarsk, 2011. 487 p.

© Леонов С. Н., Семкин П. В., Кудряшов А. С., Бессмертная Ю. С., Внуков А. А., 2019

УДК 681

## ГРУППОВОЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Н. В. Луконин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: nik-ip@yandex.ru

*Представлены основные результаты разработки технологии группового поверхностного монтажа электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры, улучшающего технологичность, надежность радиоэлектронной аппаратуры и габаритно-массовые характеристики.*

*Ключевые слова: технология, монтаж, космический аппарат, радиоэлектронная аппаратура, температурный режим, пайка.*

## GROUP OF SURFACE MOUNTING OF ELECTRONIC COMPONENTS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACECRAFTS

N. V. Lukonin

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: nik-ip@yandex.ru

*The basic results of development of technology group of surface mounted electronic components electronic equipment that improves the manufacturability and reliability of electronic equipment and the dimensions and mass characteristics.*

*Keywords: technology, installation, spacecraft, radio electronic equipment, temperature regime, soldering.*

Бортовая радиоэлектронная аппаратура (РЭА) представляет часть космического аппарата, предназначенную для управления космическим аппаратом (КА) и его системами, выполнения задач поддержания систем жизнеобеспечения в работоспособном состоянии и использования КА по целевому назначению на заданных орбитах. Конструктивно радиоэлектронные приборы состоят из набора функциональных блоков с установленными в них электрорадиоизделиями (ЭРИ), которые посредством пайки на контактные площадки (КП) многослойных печатных плат (МПП) объединены в электрические цепи с заданными свойствами и функциями.

Разработка перспективных КА с увеличенными сроками активного существования (САС) в негерметичном исполнении предъявляет повышенные требования к схемным и конструктивно-технологическим решениям бортовой РЭА, требует расширения функциональных возможностей, улучшения габаритно-массовых показателей, создания высоконадежных паяных соединений с длительными сроками использования в условиях воздействия факторов открытого космического пространства, улучшения технологичности.

Выполнение заданных технических требований возможно путем применения в РЭА радиационно-стойкой высокоинтегрированной миниатюрной электронной компонентной базы: активных ЭРИ с большим количеством выводов с матричным расположе-

нием, шагом выводов менее 0,5 мм, бескорпусных ЭРИ, безвыводных ЭРИ с размером корпуса менее 0,5×1 мм, и новых материалов. Повышение степени интеграции и миниатюризация ЭРИ накладывают повышенные требования к конструкции и технологии сборки РЭА, точности совмещения выводов ЭРИ с КП МПП, требует применения в качестве коммутационных оснований МПП более высоких классов точности с дополнительными функциональными возможностями, с распределением внутри слоев МПП наборов пассивных элементов обвязки высокоинтегрированных ЭРИ, увеличения эффективности отвода тепла от теплонагруженных ЭРИ.

С целью получения бортовой РЭА с необходимыми техническими характеристиками (ТХ) в АО «ИСС» в 2013–2019 годах в рамках программы экспериментальной отработки технологии проведена разработка новых конструктивно-технологических решений, которые могут быть внедрены в действующее промышленное производство. В качестве коммутационных оснований были разработаны МПП с защитным финишным покрытием КП химический никель/иммерсионное золото (Ni/Au), в качестве способа монтажа разработан способ группового поверхностного монтажа (ГПМ) ЭРИ РЭА [1]. Способ позволяет выполнить пайку ЭРИ одновременно на двух сторонах МПП в соответствии с требуемым температурным профилем оплавления паяльной пасты [2], 2 на рис. 1.

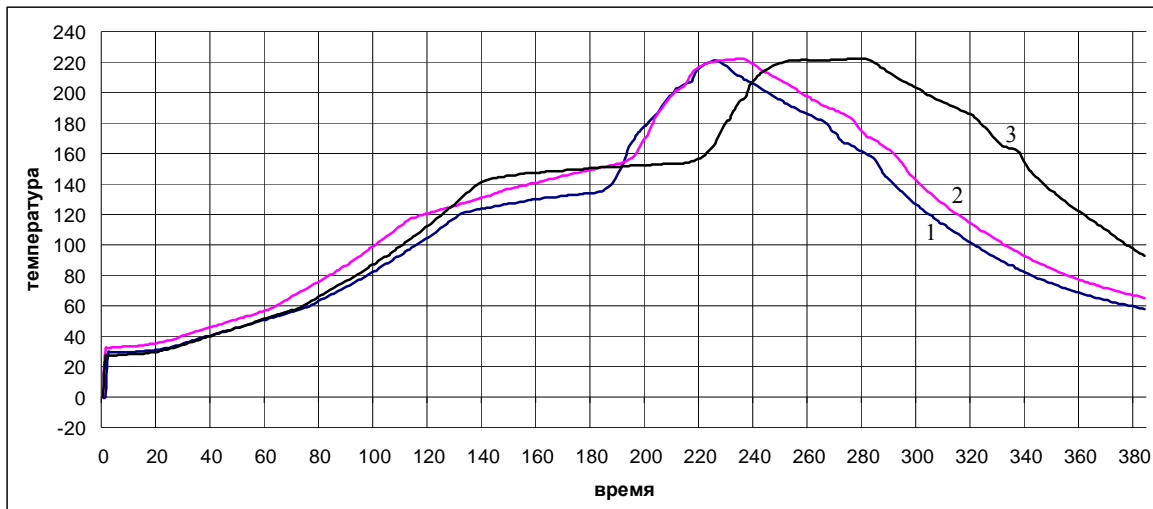


Рис. 1. Термопрофили оплавления паяльной пасты

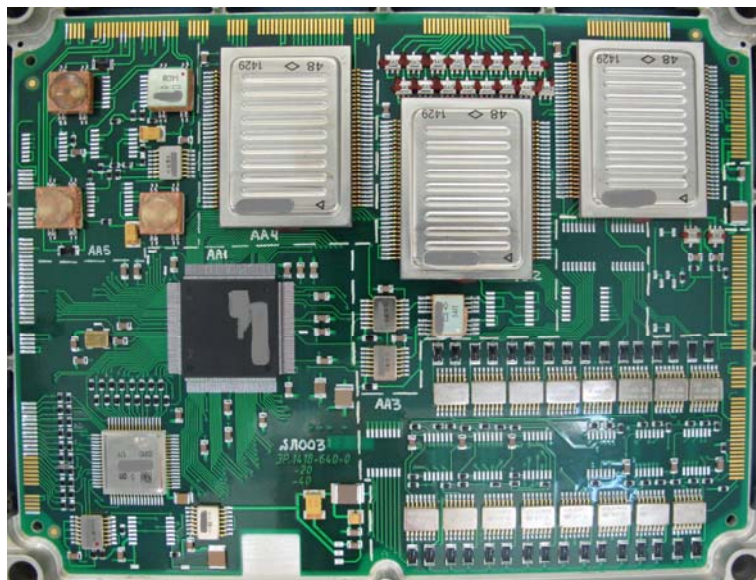


Рис. 2. Фрагмент блока с ЭРИ

Основными технологическими и критически важными операциями способа являются:

- нанесение паяльной пасты на КП МПП (клея при необходимости), заключающееся в подборе необходимого объема дозы и точности ее нанесения [3];
- установка ЭРИ, заключающаяся в совмещении выводов ЭРИ с КП МПП с необходимой точностью;
- оплавление паяльной пасты (полимеризации клея при необходимости), заключающееся в подборе оптимального режима оплавления паяльной пасты для создания большого числа высоконадежных паяных соединений выводов ЭРИ с КП МПП.

В качестве паяльных паст целесообразно использовать паяльные пасты, имеющие эвтектический состав Sn62/Pb36/Ag2 [4]. При этом следует учитывать обязательный предварительный этап растворения защитного финишного золотого покрытия при нахождении

печатной платы в зоне пайки и этап создания паяного соединения по никелевому покрытию. Время нахождения МПП в зоне пайки должно быть достаточным для растворения золотого покрытия и зависит от его толщины. На рис.2 представлен фрагмент отработочного блока прибора, изготовленного с применением технологии ГПМ ЭРИ.

Проведение групповой пайки одновременно на двух сторонах печатной платы в один этап позволяет существенно снизить трудоемкость и сложность способа монтажа, увеличить надежность, ресурс МПП и ЭРИ за счет сокращения количества температурных циклов пайки и времени высокотемпературного нагревания.

Новый способ может быть использован для изготовления РЭА гражданского назначения с заданным уровнем технологичности и качества [5].

### Библиографические ссылки

1. Пат. 2698306 Российская Федерация, Способ поверхностного монтажа электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры / Луконин Н. В., Толмачев С. А., Сунцов С. Б., Морозов Е. А., Рунова Г. Н., Черноков Д. О., Гнителиев В. П. ; заявл. 2018112192 ; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 19-2019.
2. ОСТ 4Г 0.033.200 Припой и флюсы для пайки, припойные пасты. Марки, состав, свойств и область применения / Ред. 1-78. М. 2011.
3. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007.
4. ECSS-Q-ST-70-38C Space product assurance. High-reliability soldering for surface-mount and mixed technology. ESA Requirements and Standards Division ESTEC, P.O. Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands. 2008.
5. Групповой поверхностный монтаж электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов негерметичного исполнения / Н. В. Луконин, В. Ф. Шевердов, Е. Н. Головенкин и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 12, Радиотехника. М., 2018.

### References

1. Pat. 2698306 Russian Federation, the Method of surface mounting electronic components electronic equipment / Lukonin N. V., Tolmachev, S. A., Suntsov S. B., Morozov E. A., Runova G. N., Chernakov D. O., Gnition V. P. ; Appl. 2018112192 ; publ. 10.07.2019, bull. № 19-2019.
2. OST 4G 0.033.200 Solders and fluxes for soldering, solder paste. The type, composition, properties, and applications / Ed. 1-78. Moscow, 2011.
3. Allas A. A. Laser soldering in manufacturing of electronic equipment. SPb. : SPbSU ITMO, 2007.
4. ECSS-Q-ST-70-38C Space product assurance. High-reliability soldering for surface-mount and mixed technology. VISA Requirements and Standards Division ESTEC, P. O. Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands. 2008.
5. Group of surface mounting of electronic components of radio electronic equipment of spacecrafts untight performance / N. V. Lukonin, V. F. Severov, E. N. Golovenkin, etc. // High technologies. № 12, Radio. Moscow, 2018.

© Луконин Н. В., 2019



УДК 629.764.7

**МНОГОРАЗОВАЯ ОДНОСТУПЕНЧАТАЯ РАКЕТА-НОСИТЕЛЬ**

А. И. Лыкум\*, М. Е. Марчук, И. О. Надеин, В. В. Кольга

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: rob4i@mail.ru

*Выделены основные проблемы и их возможные решение при создании многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя.**Ключевые слова: несущая способность, удельный импульс тяги, атмосферное давление, статическая устойчивость, аэродинамическая схема.***MULTIPLE ONE-STAGE CARRIER ROCKET**

A. I. Lykum\*, M. E. Marchuk, I. O. Nadein, V. V. Kolga

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: rob4i@mail.ru

*In this paper, the main problems and their possible solutions when creating a reusable single-stage launch vehicle are highlighted.**Keywords: load bearing capacity, specific impulse of thrust, atmosphere pressure, static stability, aerodynamic design.*

Многоразовая одноступенчатая ракета-носитель вот уже не одно десятилетие будоражит умы российских и зарубежных разработчиков, однако до настоящего времени таких ракет создано не было. Стоимость выведения на орбиту космических аппаратов пока очень велика. Это объясняется высокой стоимостью ракетных двигателей, дорогой системой управления, дорогими материалами, обеспечивающими несущую способность конструкции ракет и их двигателей, сложной и, как правило, дорогостоящей технологией их изготовления, подготовки к пуску и, главным образом, их одноразовым использованием. До 90-х годов XX века отсутствовала материально-техническая возможность создания многоразовых ракет-носителей. Сейчас это стало вполне возможным [5].

Для того чтобы РН смогла вывести полезный груз на околоземную орбиту необходима характеристическая скорость  $V_x$  (скорость операции выведения в сумме со всеми потерями: гравитационными, аэродинамическими и т. д.) не менее 8,5 км/с. По формуле Циолковского несложно посчитать каким должен быть удельный импульс тяги двигателя, чтобы достичь такой скорости, при совершенстве конструкции  $\mu_k$  не более 0,15 [1, с. 288]:

$$V_x = I \cdot \ln(\mu_k), \quad I = V_x / \ln(\mu_k) = 8500 / 1,89 = 4497 \text{ м/с.}$$

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы двигатель многоразовой одноступенчатой РН создавал удельный импульс тяги,  $I \approx 4497$  м/с на протяжении всей работы [4, с. 173]. Но есть серьезная проблема. Так как, с изменением высоты, атмосферное

давление уменьшается, а удельный импульс зависит от степени расширения сопла, конфигурацию сопла также необходимо менять в процессе полета. Решить эту проблему можно, используя двигатели с постоянным импульсом тяги. Существует несколько типов таких двигателей:

- 1) ЖРД с изменяемой степенью расширения сопла (патент США № 3230704);
- 2) ЖРД с выдвигаемым соплом (патент RU 2531009 С2);
- 3) клиновоздушный ракетный двигатель (патент US6516605B2).

Другая проблема связана с возвращением РН на землю. Возвращаться наша ракета должна как планер, потому что спуск ее в вертикальном положении как первая ступень Falcon 9 крайне затруднительна (нужны большие запасы топлива, чтобы погасить скорость при возврате с околоземной орбиты), однако в этом случае возникает другая проблема. Есть две точки приложения сил к ракете. Первая – центр масс (ЦМ), к которой приложены сила тяги двигателя и сила тяжести, вторая – центр давления (ЦД), к которой приложена равнодействующая аэродинамической силы. Для обеспечения статической устойчивости ракеты в полете ее центр масс (ЦМ) должен лежать выше центра давления (ЦД). Такая ракета все время будет стремиться сохранить ориентацию корпуса по траектории, и, следовательно, будет статически устойчивой [2, с. 239]. При снижении ракеты в атмосфере на этапе возвращения на Землю, ее ЦМ, для устойчивого полета должен находиться примерно на 1/3 хорды крыла. То есть взаиморасположение ЦМ и ЦД в процессе полета должно измениться [3, с. 163].

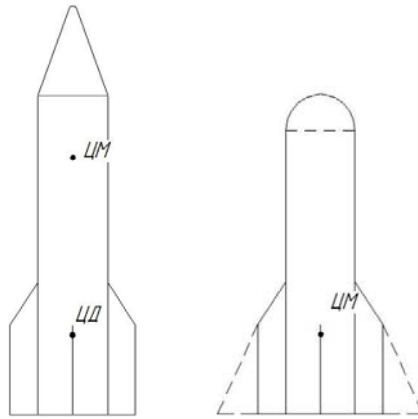


Рис. 1. Схема РН с отбрасываемой головной частью

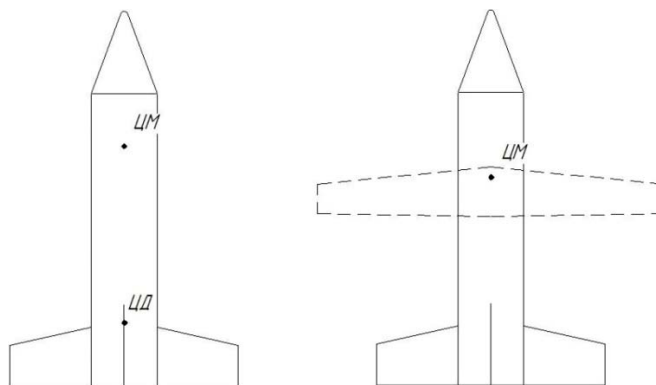


Рис. 2. Схема РН с использованием крыльев

Один из возможных вариантов решения этой проблемы – смещение ЦМ за счет отделения полезного груза на орбите и отбрасывания головного обтекателя (рис. 1).

Другим вариантом решения этой задачи может быть наличие дополнительных крыльев у ракеты и их активизация после сброса полезной нагрузки (рис. 2).

Выбор оптимальной аэродинамической схемы ракеты и конструкции двигателя может быть осуществлен только после подробного расчета конструкции и характеристик двигателя, что в дальнейшем и планируется осуществить.

#### Библиографические ссылки

1. Дмитриевский А. А. Внешняя баллистика. М. : Машиностроение, 1972. 579 с.
2. Остославский И. В., Стражева И. В. Динамика полета. Траектория летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1969. 499 с.
3. Тестоедов Н. А., Кольга В. В., Семенова Л. А., Проектирование и конструирование баллистических ракет и ракет носителей: учеб. пособие Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. Красноярск, 2014. 308 с.
4. Феодосьев В. И. Основы техники ракетного полета. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 487 с
5. В России разрабатывают многоразовую ракету [Электронный ресурс] // Arms-expo. URL:

[https://www.arms-expo.ru/news/novye-razrabotki/v-rossii-razrabatyvayut-mnogorazovuyu-raketu/?sphrase\\_id=16337411](https://www.arms-expo.ru/news/novye-razrabotki/v-rossii-razrabatyvayut-mnogorazovuyu-raketu/?sphrase_id=16337411) (дата обращения: 10.08.2019).

#### References

1. Dmitrievsky A. A. Vneshnyayaballistika (External ballistics). M. : MechanicalPubl., 1972. 579 p.
2. Ostoslavskii I. V., Strazeva I. V. Dinamikapoleta. Traektorialeatelnixapparatov (The Flight dynamics. Aircraft trajectory). M. : Mashinostroenie Publ., 1969. 499 p.
3. Testoedov N. A., Kolga V. V, Semenova L. A. Proyektirovaniyeikonstruirovaniyeballisticheskikh raketira ketnykhnositeley : uchebnoye posobiye / Sib. state aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2014. 308 p.
4. Feodocev V. I. Osnovitexnikiraketnogopoleta( The Basics technology of rocket flight). M. : Nayka. Glavnayaredakciafiziko-matematicheskoi literatyri Publ., 1979. 487 p.
5. V Rossii razrabatyvayut mnogorazovuyu raketu [Electronic resource] // Arms-expo. URL: [https://www.arms-expo.ru/news/novye-razrabotki/v-rossii-razrabatyvayut-mnogorazovuyu-raketu/?sphrase\\_id=16337411](https://www.arms-expo.ru/news/novye-razrabotki/v-rossii-razrabatyvayut-mnogorazovuyu-raketu/?sphrase_id=16337411) (access: 10.08.2019).

© Лыкум А. И., Марчук М. Е.,  
Надеин И. О., Кольга В. В., 2019

## ВОЗВРАЩАЕМАЯ СТУПЕНЬ

М. Е. Марчук\*, И. О. Надеин, В. В. Кольга, А. В. Быков, А. И. Лыкум

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
\*E-mail: mmarchuk98@mail.ru

*Исследованы и выделены преимущества и недостатки двух траекторий, по которым может возвращаться первая ступень.*

*Ключевые слова: возвращаемая ступень, траектория, топливо, посадка, оптимизация.*

## RETURNED STAGE

M. E. Marchuk\*, I. O. Nadein, V. V. Kolga, A. V. Bykov, A. I. Lykum

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: mmarchuk98@mail.ru

*In this work, researchers and highlighted the advantages and disadvantages of two paths along which the first stage can return.*

*Keywords: return stage, trajectory, fuel, landing, optimization.*

Возвращение первой ступени ракеты-носителя на данный момент является одним из самых важных шагов к экономии в ракетостроении, так как это позволит существенно снизить затраты средств и времени на изготовление первой ступени.

Одна из проблем, которая возникает при анализе траектории полета возвращаемой первой ступени – это расчет количества топлива, требующегося для обеспечения возврата.

Для определения количества топлива рассмотрим два варианта траектории. В качестве начальных параметров выберем некую «базовую» орбиту высотой 200 километров [1].

**Первая траектория.** После отделения первая ступень совершает разворот и возвращается в точку старта. Преимуществом данной траектории является фактор времени: не требуется доставлять ступень к месту следующего пуска.

**Вторая траектория.** После отделения первая ступень движется по баллистической траектории и совершает посадку в точке удаленной от стартовой площадки. Преимуществом данной траектории является экономия топлива по сравнению с первым вариантом. Недостатком – необходимость строительства дополнительных площадок или сложность приземления на плавучую платформу.

Для оптимизации траектории, и ее дальнейшего расчета выделим следующие проблемы.

1. Рассчитать необходимое количество топлива для спасения ступени и ее возврата в точку старта.

2. Разработать конструкцию первой ступени, с возможностью разворота корпуса на этапе возвращения.

3. Учесть условия движения в плотных слоях атмосферы, предусмотреть наличие экрана, покрытия, защищающего корпус от перегрева [6, с. 127].

4. Обеспечить создание необходимых условий для повторного запуска двигателя с целью создания тормозного импульса. Оценить количество требуемых включений.

5. Оценить необходимость и эффективность использования тормозных парашютов.

6. Рассмотреть различные варианты ориентации корпуса ракеты по траектории возврата. Проанализировать эффективность торможения верхним днищем, изолированным защитным экраном и созданием импульса тяги против скорости движения.

7. Выбор оптимальной программы угла тангажа, с целью уменьшения негативного воздействия атмосферы, минимизация коэффициента перегрузки и нагрева корпуса [4, с. 336].

8. Для первой траектории актуально создание максимальной по значению подъемной аэродинамической силы [3, с. 318].

В конструкции возвращаемой ступени должна быть предусмотрена возможность контроля углов атаки при входе в атмосферу для обеспечения максимальных значений подъемной силы.

Ниже представлена математическая модель, описывающая движение на участке входа. Скорость при отделении первой ступени 6000 км/ч, угол тангажа  $\theta = 20$  градусов. Ускорение свободного падения считаем постоянным. Считаем тело осесимметричным, двигающимся с нулевым углом атаки, при отсутствии ветра. Коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_x = 0,22$ .

Уравнение движения

$$m \frac{dv}{dt} = -X - G \sin \theta, \quad mv \frac{d\theta}{dt} = -G \cos \theta,$$

где  $X$  – сила аэродинамического сопротивления;  $G$  – сила тяжести.

При построении математических моделей, описывающих движение по траекториям, следует учитывать воздействие атмосферы.

При выборе траектории полета ракеты необходимо провести ее прочностной анализ с учетом перегрузки на этапе снижения [2, с. 383]. Она может быть уменьшена несколькими методами, например, изменение конфигураций и аэродинамических качеств спасаемой ступени во время её «приземления» [5, с. 129]. Или создание подъемной силы при малых углах входа в атмосферу.

#### Библиографические ссылки

1. Эксперт рассказал, в чем преимущества возвращаемой ступени ракеты-носителя [Электронный ресурс] // РадиоSp. URL: <https://radiosputnik.ria.ru/20180920/1528958536.html> (дата обращения: 10.08.2019).

2. Дмитриевский А. А. Внешняя баллистика. М. : Машиностроение, 1972. 579 с.

3. Константинов М. С., Каменков Е. Ф., Перельгин Б. П. и др. Механика космического полета : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1989. 401 с.

4. Остославский И. В., Стражева И. В. Динамика полета. Траектория летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1969. 499 с.

5. Тестоедов Н. А., Кольга В. В., Семенова Л. А. Проектирование и конструирование баллистических ракет и ракет носителей : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. 308 с.

6. Феодосьев В. И. Основы техники ракетного полета. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 487 с.

#### References

1. The expert said what are the advantages of the return stage of the launch vehicle [Electronic resource] // RadioSp. URL: <https://radiosputnik.ria.ru/20180920/1528958536.html> (access: 10.08.2019).

2. Dmitrievsky A. A. External ballistics. Moscow, Mechanical Engineering, 1972. 579 p.

3. Konstantinov M. S., Kamenkov E. F., Perelygin B. P. et al. Space flight mechanics: a textbook for universities. Moscow, Mechanical Engineering, 1989. 401 p.

4. Ostoslavsky I. V., Strazheva I. V. Flight dynamics. The trajectory of the aircraft. Moscow, Machine-building, 1969. 499 p.

5. Testoedov N. A., Kolga V. V., Semenova L. A. Design and construction of ballistic missiles and carrier rockets: textbook. allowance / Sib. state aerospace un-t Krasnoyarsk, 2014. 308 s.

6. Feodosiev V. I. Fundamentals of rocket technology in the summer. Moscow, Science. The main edition of the physical and mathematical literature, 1979. 487 p.

© Марчук М. Е., Надеин И. О., Кольга В. В., Быков А. В., Лыкум А. И., 2019

УДК 004.942

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ В ЗОНАХ БОЛЬШОЙ КРИВИЗНЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MSC NASTRAN\*

И. С. Михина<sup>1</sup>, Д. О. Шендалев<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>1</sup>, Л. А. Бабкина<sup>1</sup>, Я. Е. Калинин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: L\_babkina@mail.ru

*Представлен алгоритм конечно-элементного моделирования тонкостенной оболочки в зонах локальной большой кривизны на примере диафрагмы-разделителя топливного бака малой тяги ракетного двигателя в программном комплексе MSC Nastran.*

*Ключевые слова: численное моделирование, оболочка, MSC Nastran.*

## NUMERICAL MODELING OF A THIN-WALLED SHELL IN LARGE CURVE AREAS IN THE MSC NASTRAN SOFTWARE PACKAGE

I. S. Mikhina<sup>1</sup>, D. O. Shendalev<sup>1</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>1</sup>, L. A. Babkina<sup>1</sup>, Ya. E. Kalinnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: L\_babkina@mail.ru

*The article presents finite element simulation algorithm of a thin-walled shell in local large curve areas evidence from microthrustor fuel tank diaphragm separator in the MSC Nastran software package.*

*Keywords: numerical modeling, shell, MSC Nastran.*

Построение модели пластического деформирования материала при выворачивании тонкостенных оболочек вращения (например, диафрагмы-разделителя топливного бака ракетного двигателя малой тяги) является сложной задачей, обусловленной наличием геометрической и физической нелинейности. Физическая модель поведения материала в торовой зоне перекатывания, используемая в подавляющем числе публикаций, основана на допущениях не полностью отражающих реальную картину границ зоны пластического деформирования материала [1–4].

При численных исследованиях в программных комплексах для инженерных расчетов типа MSC Nastran основу для расчета всегда представляет конечно-элементная модель (КЭМ) [5; 6]. В работе объектом исследования являются разделители с постоянной и переменной толщиной от 2,0 до 3,5 мм, поэтому сложность создания КЭМ заключается в ручном формировании конечных элементов в зоне перекатывания.

Создание геометрической модели основано на: построении отрезков и кривых по координатам; заполнении контура поверхностью; вытягивании и вращении поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Геометрическая модель

\*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по федеральному целевому проекту, соглашение № 14.575.21.0144.

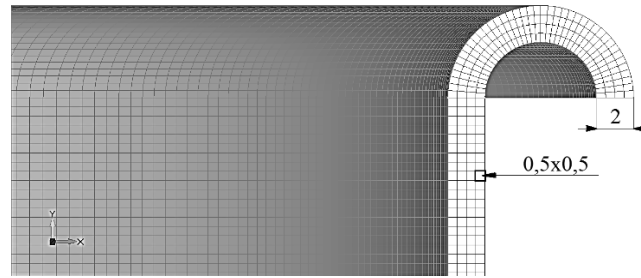


Рис. 2. Толщина оболочки модели и размеры конечных элементов

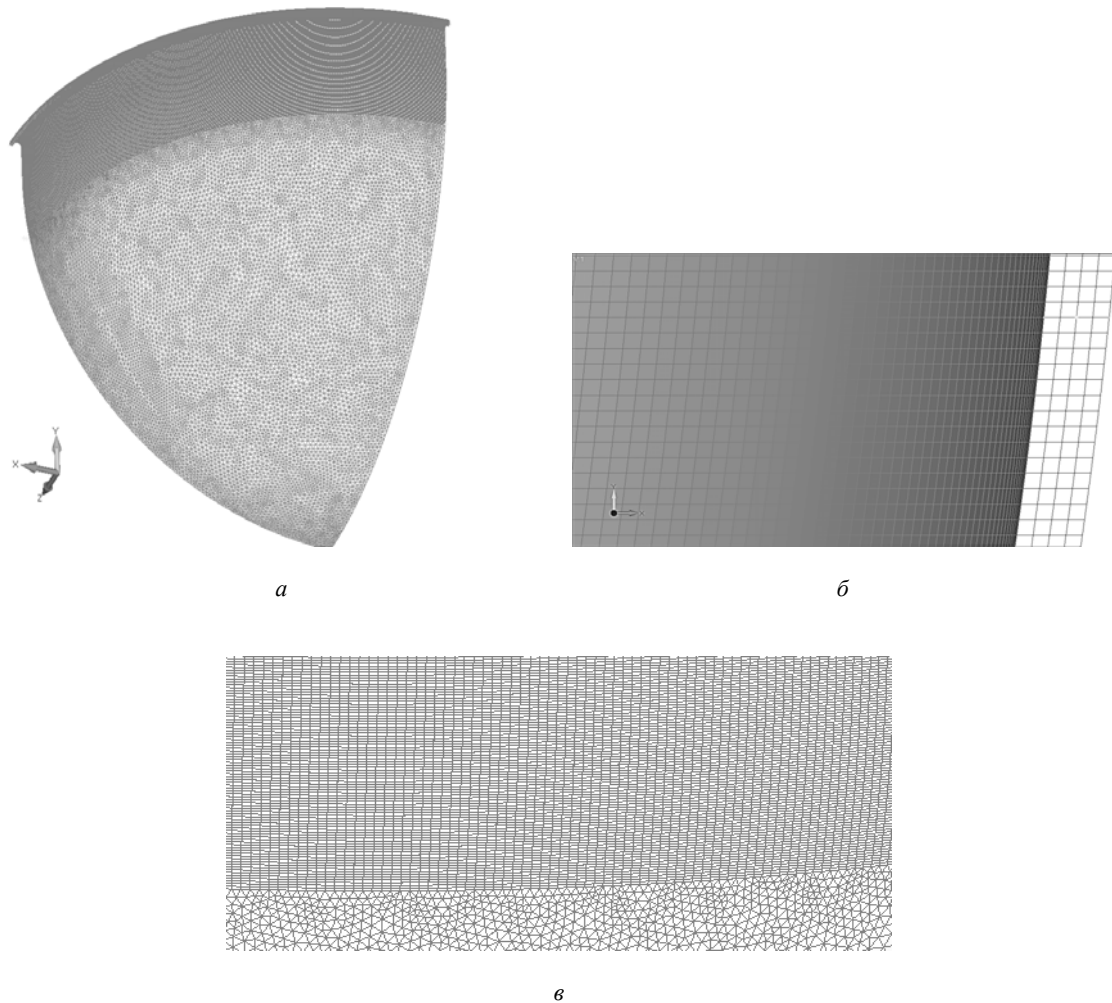


Рис. 3. Дискретизация расчетной области на КЭ:  
 а – общий вид; б – по толщине модели (увеличенный фрагмент);  
 в – в радиальном направлении (увеличенный фрагмент)

Создание КЭМ (рис. 2) включает: задание свойств материала (модуль упругости  $E = 7 \cdot 10^9$  ГПа, плотность  $\rho = 7\,700$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,28$ ); разбиение участков образующей на отрезки для дальнейшего построения сетки (на внешней поверхности торового участка диафрагмы  $r = 5$  мм кривая вручную разбивается на 40 отрезков, а по толщине ( $h = 2$  мм) оболочка разбивается на 4 отрезка); создание твердотельных конечных элементов (КЭ) типа *Brick*.

Для решения поставленной задачи – определения границ зоны пластического деформирования материала КЭМ получилась чересчур ресурсоемкой. Для облегчения модели было решено использовать два типа твердотельных КЭ: *Brick* и *Tetra* (рис. 3). В результате дискретизации расчетной области общее количество элементов составило 1 890 583, узлов 2 574 523.

Разработанная модель послужит основой создания методики исследования напряженно-деформиро-

ванного состояния границ торовой зоны для уточнения модели формирования пластических шарниров при деформировании тонкостенных оболочки. Дополнительный интерес представляет потеря устойчивости оболочки около зоны перекачивания при симметричном и несимметричном (с перекосом) выворачивании диафрагмы.

#### Библиографические ссылки

1. Исследование усилий деформирования и разрушения инженерных мембран / В. Б. Горлов, В. В. Кашелкин, П. Е. Недошивин, В. М. Свешников // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький : Изд-во Горьковского ун-та, 1986, С. 107–110.
2. Ефремов В. Н., Журавлев В. Ю., Якубович О. П. Разделители топливных баков с отрицательной деформацией параллели : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 76 с.
3. Кубриков М. В., Журавлев В. Ю. Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4(30). С. 105–107.
4. Кубриков М. В. Метод проектирования выворачивающихся диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2011. 125 с.
5. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники / И. М. Безмогзий, А. Н. Софинский, А. Г. Чернягин // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 71–80.
6. Конечно-элементное моделирование авиационных конструкций в программном комплексе MSC NASTRAN : метод. указания / сост. А. С. Кузнецов и др. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. 69 с.

#### References

1. *Issledovaniye usiliy deformirovaniya i razrusheniya inzhenernykh membrane* [Study of the forces of deformation and fracture of engineering membranes] / V. B. Gorlov, V. V. Kachelkin, P. Ye. Nedoshivin, V. M. Sveshnikov // *Prikladnyye problemy prochnosti i plastichnosti*. Gor'kiy : Izd-vo Gor'kovskiy universitet, 1986, P. 107–110 (In Russ.).
2. Yefremov V. N., Zhuravlev V. Yu., Yakubovich O. P. *Razdeliteli toplivnykh bakov s otritsatel'noy deformatsiyey paralleli* [The deformation fuel tank dividers]: monogr. / Sib.gos.aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2005. 76 p.
3. Kubrikov M. V., Zhuravlev V. Yu. *Proyektirovaniye diafragm-razdeliteley udlinennykh toplivnykh bakov* [Designing diaphragm-dividers for elongated fuel tanks] // *Vestnik SibGAU*. 2010. Vol. 4 (30). P. 105–107.
4. Kubrikov M. V. *The design method of eversible diaphragm separators of elongated fuel tanks* [Design method for twisting diaphragm-dividers of elongated fuel tanks] : thesis. for a job. student step. Cand. tech. Sciences. Krasnoyarsk, 2011. 125 p.
5. *Modelirovaniye v zadachakh vibroprochnosti konstruktсий raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Modelirovaniye v zadachakh vibroustoychivosti konstruktсий raketno-kosmicheskoy tekhniki] / I. M. Bezmozgiiy, A. N. Sofinsky, A. G. Chernyagin // *Space Engineering and Technology*. 2014. № 3 (6). P. 71–80 (In Russ.).
6. *Konechno-elementnoye modelirovaniye aviatsionnykh konstruktсий v programmnykh kompleksakh MSC NASTRAN*: metod. ukazaniya / sost. A. S. Kuznetsov et al. Samara : Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2010. 69 p. (In Russ.).

© Михина И. С., Шендалев Д. О., Журавлев В. Ю.,  
Бабкина Л. А., Калинин Я. Е., 2019

УДК 629.76/78

## ОПТИМАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ОБТЕКАТЕЛЯ БОКОВОГО БЛОКА РКН

К. Е. Мустафинов, М. Ж. Анаров, П. А. Конопля, М. М. Майер, К. Айдос, Е. Н. Шахматов

Филиал АО «СП «Байтерек» на комплексе «Байконур»  
Республика Казахстан, г. Байконур, ул. Абая 16, тел. (33622) 2-35-44  
E-mail: bayterek\_filial@mail.ru

*Определение оптимальной конструкции обтекателя бокового блока с учетом массовых и аэродинамических характеристик РКН.*

*Ключевые слова: обтекатель бокового блока, осесимметричный обтекатель, косоугольный обтекатель, лобовое сопротивление.*

## OPTIMAL DESIGN OF THE FAIRING OF THE RCN SIDE BLOCK

K. Mustafinov, M. Anarov, P. Konoplya, M. Mayer, K. Aidos, E. Shakhmatov.

Branch of JSC JV "Bayterek" at the complex "Baikonur"  
16, Abay Str., Baikonur, Republic of Kazakhstan, tel.: (33622) 2-35-44  
E-mail: bayterek\_filial@mail.ru

*Determination of the optimal design of the fairing of the side block, taking into account the mass and aerodynamic characteristics of the RCN.*

*Keywords: fairing side of the block, axisymmetric cone, oblique cone fairing, frontal drag.*

Осесимметричная конструкция головного обтекателя боковых блоков является наиболее распространенной, как правило, это связано с простотой производства и гибко изменяемыми аэродинамическими свойствами.

Обтекатели в форме косого конуса применяются значительно реже, нежели осесимметричные обтекатели.

Задача заключается в выборе оптимальной конструкции обтекателя бокового блока из двух вариантов:

- осесимметричная конструкция обтекателя (далее – вариант 1);
- головной обтекатель в форме косого конуса (далее – вариант 2).

Для выбора оптимальной конструкции, необходимо задаться критериями выбора:

- критерий минимальной массы;
- аэродинамический критерий (коэффициент лобового сопротивления).

Расчет предлагается производить путем имитации полета РКН на участке максимального скоростного напора. Имитация полета проводилась в САПР «SolidWorks Flow Simulation».

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Стоит отметить, что касательная скорость предварительно раскладывается на орты, определяемой системой координат, привязанной к РКН (рис. 1).

При расчете предполагается, что РКН неподвижен, подвержен воздействию воздушного потока со скоростями  $V_x = -433$  м/с,  $V_y = -274$  м/с. Данная расчетная модель является абсолютно эквивалентной (согласно принципу относительности) условиям реального полета.

Для расчета используется относительно грубая сетка (рис. 1), в виду недостаточности мощных располагаемых вычислительных мощностей. Параметры сетки представлены ниже в табл. 2.

Результаты расчета исследуемых параметров приведены в табл. 3, 4 (рис. 2). Эпюры с распределением скоростного напора и температурой на поверхности исследуемых моделей представлены в виде иллюстративно-графического материала.

Согласно результатам, первый вариант исполнения головного обтекателя имеет более высокие аэродинамические характеристики ( $C_x = 0,806 < 0,869$ ), в то же время, испытывает больший нагрев, что объясняется меньшей площадью обтекателя.

Для окончательного выбора конструкции головного обтекателя определены массовые и геометрические характеристики.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

$\theta$ , град	$h$	$g$	$T$	$V$	$a$	$M$	$X$	$\theta$ , рад	$a$
57,70	6 133	9,78	242,34	513,98	21,14	1,66	18 573	1,01	309,32



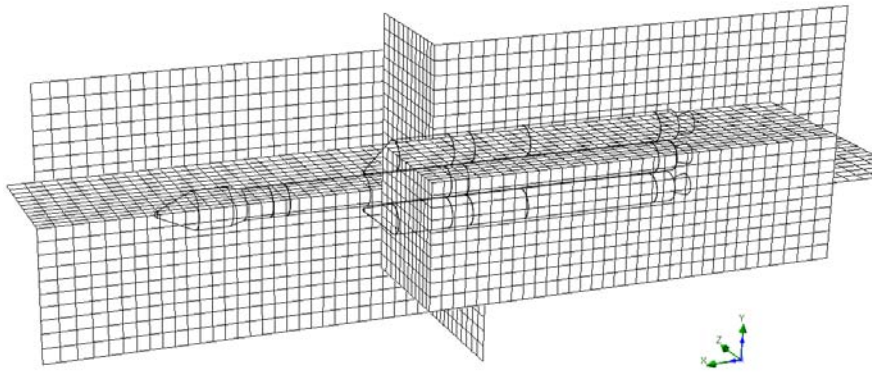


Рис. 1. Расчетная сетка

Таблица 2

## Параметры расчетной сетки

Число ячеек по X	64
Число ячеек по Y	20
Число ячеек по Z	24
Ячейки	32854
Ячейки в текучей среде	31748
Ячейки в твердом теле	1106
Частичные ячейки	992
Иррегулярные ячейки	0
Усеченные ячейки	0

Таблица 3

## Результаты расчета (вариант 1)

Имя цели	Единица измерения	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Дельта
Плотность (текучая среда)	[кг/м <sup>3</sup> ]	2,428	2,428	2,428	0,000
Скорость (X)	[м/с]	-422,674	-422,772	-422,522	0,164
Скорость (Y)	[м/с]	-258,351	-258,356	-258,341	0,012
Температура (твердое тело)	[К]	367,807	366,869	368,658	0,211
Коэффициент лобового сопротивления		0,806	0,783	0,858	0,075

Таблица 4

## Результаты расчета (вариант 2)

Имя цели	Единица измерения	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Дельта
Плотность (текучая среда)	[кг/м <sup>3</sup> ]	2,447	2,447	2,448	0,000
Скорость (X)	[м/с]	-420,078	-420,261	-419,853	0,260
Скорость (Y)	[м/с]	-255,421	-255,435	-255,399	0,037
Температура (твердое тело)	[К]	364,705	363,581	365,388	0,683
Коэффициент лобового сопротивления		0,95	0,91	0,99	0,065

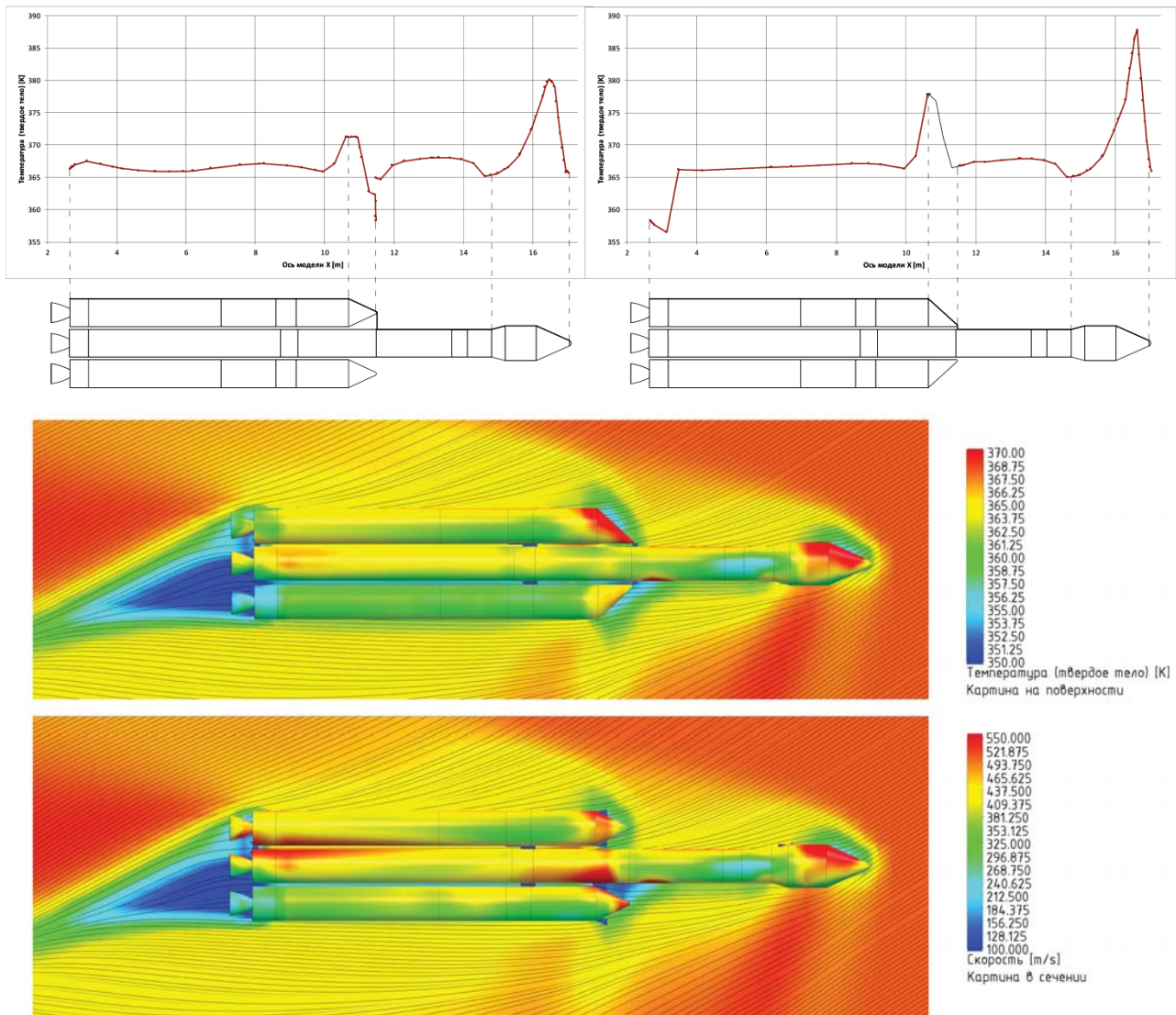


Рис. 2. Результаты расчета исследуемых параметров

Вычисления параметров производились с помощью построенных моделей в САПР «SolidWorks» инструмента «Массовые характеристики», при допущении, что толщина обеих обтекателей одинакова.

В ходе определения оптимальной конструкции обтекателя бокового блока определена оптимальная геометрическая форма головного обтекателя бокового блока. Для выбора оптимальной конструкции были заданы критерии выбора: критерий минимальной массы, аэродинамический критерий (коэффициент лобового сопротивления). Проведение сравнительного анализа разных вариантов исполнения бокового блока было возможным благодаря использованию САПР.

Результаты расчета массовых и аэродинамических характеристик выделили осесимметричное исполнение обтекателя бокового блока более предпочтительным.

### Библиографические ссылки

1. Аппазов Р. Ф., Лавров С. С., Мишин В. П. Баллистика управления ракет дальнего действия. М.: Наука, 1966.
2. Куренков В. И. Конструкция и проектирование изделий ракетно-космической техники. Самара, 2012.

### References

1. Appazov R. F., Lavrov S. S., Mishin V. P. long-range missile control Ballistics. Moscow, Science, 1966.
2. Kurenkov V. I. Design and engineering of rocket and space technology products. Samara, 2012.

© Мустафинов К. Е., Анаров М. Ж., Конопля П. А., Майер М. М., Айдос К., Шахматов Е. Н., 2019

**КОНЦЕПЦИЯ ВОЗДУШНОГО СТАРТА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ**

И. О. Надеин\*, В. В. Кольга, А. В. Быков, М. Е. Марчук, А. И. Лыкум

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: nailol2@icloud.com

*Старт в воздухе ракеты-носителя с борта воздушного средства, в сравнении со стартом со стационарной установки на Земле, позволяет увеличить грузоподъемность ракеты-носителя, расширить область запусков и диапазон реализуемых наклонений орбит, снизить экономические затраты.*

*Ключевые слова: ракета-носитель, воздушный старт, характеристическая скорость, орбита, масса полезного груза.*

**AIR LAUNCH CARRIER-ROCKET CONCEPT**

I. O. Nadein\*, V. V. Kolga, A. V. Bykov, M. E. Marchuk, A. I. Lykum

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: nailol2@icloud.com

*Launch in the air a carrier-rocket from an aircraft, in comparison with a launch from a fixed installation on the ground, allows to increase carrying capacity of a carrier-rocket, to expand the launch area and the range of implemented inclinations of orbits, and reduce economic costs.*

*Keywords: carrier-rocket, air launch, characteristic velocity, orbit, payload mass.*

Воздушный старт – это старт ракеты с воздушного средства, которое находится в полете. Самолёт-носитель (СН) может с борта осуществлять запуск ракеты-носителя (РН). В приоритет берется воздушное средство, обладающее наибольшими возможностями по высоте, дальности полёта и скорости. В данном случае самолёт – многоразовая разгонно-стартовая система. Такой авиационно-ракетный комплекс (АРК) на основе самолёта и ракеты расширяет возможность независимого доступа в космос и осуществления услуг запуска на мировом рынке [1].

Во время воздушного старта, самолёт преодолевает наиболее плотные слои атмосферы, что позволяет РН получить высокую стартовую скорость. При высоте в 10 километров плотность атмосферы уменьшается в 3,3 раза, следовательно, при воздушном старте уменьшаются потери скорости ракеты на аэродинамическое сопротивление. Данный старт даёт на 25–30 процентов большие энергетические возможности по выведению РН [1].

Стартуя в воздухе, РН приобретает дополнительные функциональные возможности, такие как выбор района старта, который может включать приэкваториальные широты, получение дополнительных зон отчуждения под падение отработавших ступеней РН.

На данный момент наиболее перспективным выглядит РН «Полёт» (см. таблицу).

Ракета-носитель двухступенчатый, выполненный по тандемной схеме с коническим головным обтекателем. При этом могут использоваться жидкостные, или твердотопливные ракетные двигатели.

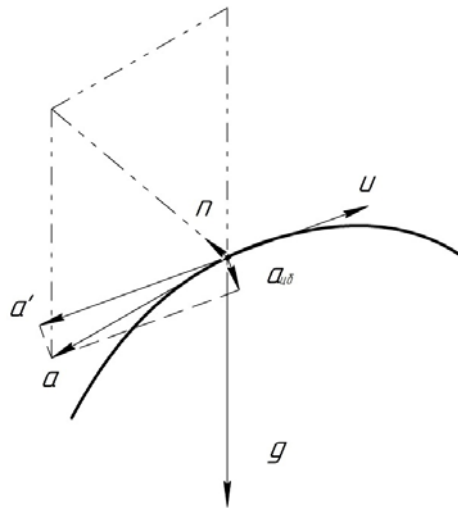
РН располагается внутри грузового отсека СН в следующих вариантах: с использованием десантной платформы, парашютной схемы десантирования, с использованием транспортного пускового контейнера, минометной схемы десантирования. Выброс ракеты-носителя производится через задний грузовой люк СН.

**Параметры ракет-носителей**

Наименование	Стартовая масса, т	Масса полезной нагрузки, кг	Характеристика орбиты, км
Полёт	100	800–4500	200–35786
LauncherOne	26	300	200–800
Pegasus XL	23,13	443	200

В условной области запуска для создания РН благоприятных условий при десантировании из СН и хороших стартовых показателей, самолёт-носитель выполняет маневр «Горка» с выходом на параболическую траекторию, которая обеспечивает в течение 6...10 секунд режим полета близкий к невесомости, когда нормальная перегрузка на ракету-носитель не превышает 0,1...0,3 единицы (см. рисунок). Это позволяет в 2...2,5 раза поднять сбрасываемую массу РН в сравнении с десантированием в горизонтальном полёте и, следовательно, увеличить грузоподъемность [2].

Отделение полезного груза при выводе на условную орбиту происходит после реализации программ полёта 1-й и 2-й ступеней РН и разгонного космического блока.



Коэффициент перегрузки РН во время выполнения манёвра

$$n = \frac{\bar{a} - \bar{g}}{|g|} - \text{вектор перегрузки, во время манёвра,}$$

где  $u$  – вектор скорости ЛА;  $g$  – вектор ускорения свободного падения;  $a'$  – вектор ускорения ракеты-носителя;  $a_{цб}$  – вектор центростремительного ускорения.

Сравним характеристическую скорость ракеты-носителей «Полёт» и «Союз 2.1в» при массе полезной нагрузки равной 1,5 тонны.

Характеристическая скорость РН «Полёт» равна:

$$U_x = U_1 + U_2 + U_c,$$

где  $U_1$  – конечная скорость 1-й ступени;  $U_2$  – конечная скорость 2-й ступени;  $U_c = 194,7 \frac{M}{c}$  – скорость СН.

Определим слагаемые характеристической скорости [3]:

$$U_1 = -w_1 \ln \mu_1, \quad U_2 = -w_2 \ln \mu_2,$$

где  $w_1 = 3521,8 \frac{M}{c}$  – удельный импульс двигателя

в пустоте 1-й ступени;  $w_2 = 3629,7 \frac{M}{c}$  – удельный импульс двигателя в пустоте 2-й ступени;  $\mu_1 = 0,215$  – относительная конечная масса 1-й ступени;  $\mu_2 = 0,259$  – относительная конечная масса 2-й ступени.

Получим:

$$U_1 = 5413,4 \frac{M}{c}, \quad U_2 = 4903,5 \frac{M}{c},$$

$$U_c = 164,7 \frac{M}{c}, \quad U_x = 10511,3 \frac{M}{c}.$$

Характеристическая скорость РН «Союз 2.1в» при заданных параметрах составляет:

$$U'_x = 10124,7 \frac{M}{c}.$$

Орбитальная скорость на низкой опорной орбите (НОО):

$$U = \sqrt{\frac{GM}{R+H}} = 7748,6 \frac{M}{c}.$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{M^3}{c^2 \cdot \text{кг}}$  – гравитационная постоянная;  $M = 5,97 \cdot 10^{24}$  кг – масса планеты;  $R = 6371$  км – радиус Земли;  $H = 200$  км – высота НОО.

При запуске с самолёта-носителя, «Полёт» имеет аналогичную характеристическую скорость с ракетами-носителями, запускаемыми с поверхности, этого вполне достаточно для функционирования на низкой опорной орбите. Эффективность данного способа запуска ракеты-носителя будет выше при меньших затратах и лучших условиях старта. Суммарная грузоподъемность такого РН возрастает.

### Библиографические ссылки

1. Испытания воздушного старта возможны через три года [Электронный ресурс] // Новости ВПК. URL: [https://vpk.name/news/241494\\_vladimir\\_degtyar\\_issyitaniya\\_vozdushnogo\\_starta\\_vozmozhnyi\\_cherez\\_tri\\_goda/](https://vpk.name/news/241494_vladimir_degtyar_issyitaniya_vozdushnogo_starta_vozmozhnyi_cherez_tri_goda/) (дата обращения: 21.09.2019).
2. Российский аэрокосмический проект «Воздушный старт» [Электронный ресурс] // Центр военно-политических исследований. URL: <http://eurasian-defence.ru/?q=node/2644> (дата обращения: 22.09.2019)
3. Феодосьев В. И. Основы техники ракетного полёта. 1979. С. 26.

### References

1. Test of air start in three years [Electronic resource] // Novostavby. URL: [https://vpk.name/news/241494\\_vladimir\\_degtyar\\_issyitaniya\\_vozdushnogo\\_starta\\_vozmozhnyi\\_cherez\\_tri\\_goda/](https://vpk.name/news/241494_vladimir_degtyar_issyitaniya_vozdushnogo_starta_vozmozhnyi_cherez_tri_goda/) (access: 21.09.2019).
2. Russian aerospace project "Air start" [Electronic resource] // Center for military and political studies. URL: <http://eurasian-defence.ru/?q=node/2644> (access: 22.09.2019)
3. Feodosiev V. I. Fundamentals of rocket flight techniques. 1979. P. 26.

© Надеин И. О., Кольга В. В., Быков А. В., Марчук М. Е., Лыкум А. И., 2019

УДК 534.322

## О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

С. А. Орлов<sup>1</sup>, В. И. Копытов<sup>1</sup>, К. А. Матвеев<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

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

*При проведении автономной отработке бортовой аппаратуры и систем различных космических аппаратов ударные воздействия остаются наиболее сложным видом механических испытаний. Рассматривается возможность формирования ударных воздействий по методу ударных спектров ускорений с использованием различного испытательного оборудования, дается характеристика типовых стендов, обсуждаются вопросы преимуществ и недостатков применяемого оборудования.*

*Ключевые слова: бортовая аппаратура, ударные испытания, ударный спектр ускорений.*

## ABOUT SOME PROBLEMS ARISING IN TESTS OF LARGE-DIMENSIONAL STRUCTURES OF SPACECRAFT ON SHOCK IMPACTS OF HIGH INTENSITY

S. A. Orlov<sup>1</sup>, V. I. Kopytov<sup>1</sup>, K. A. Matveev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

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

*When conducting off-line testing of on-board equipment and systems of various spacecraft, shocks remain the most difficult type of mechanical test. In this paper, we consider the possibility of forming impacts by the method of shock acceleration spectra using various test equipment, give a description of typical stands, discuss the advantages and disadvantages of the equipment used.*

*Keywords: on-board equipment, shock tests, acceleration shock spectrum.*

При проведении автономной отработке бортовой аппаратуры и систем различных космических аппаратов (КА) ударные воздействия остаются наиболее сложным видом механических испытаний. Требования на системы КА (например, солнечные батареи, антенны и т. д.) в настоящее время задаются в виде ударных спектров ускорений полученных при добротности, как правило, равной 10 [1–3]. При этом источником ударных воздействий на КА и его подсистемы являются пиротехнические устройства ракеты-носителя и КА [1; 2; 4].

Ударные воздействия передаются по КА в виде затухающей нестационарной вибрации. При этом, наиболее распространенные механические ударные стенды со свободно падающим столом и с ускоренным падением стола, выпускаемые как отечественными, так и зарубежными фирмами, ориентированы, в первую очередь, на создание одиночного импульса. Кроме того, солнечные батареи, как и большинство крупногабаритных антенн не помещаются на столах классических ударных стендов. Большие проблемы

возникают и при необходимости создания положительных и отрицательных импульсов [5–7].

Одной из альтернатив использованию классических ударных стендов могут служить стенды с пиротехническими элементами, которые не нарушают «физику» ударного нагружения при испытаниях по сравнению с реальными условиями эксплуатации КА [8]. При этом риск повреждения конструкций становится минимальным. Примером такого устройства может быть СПУ 762.6105-0 [8].

Устройство выполнено таким образом, что варьируя формой и материалом бойка, типом газогенераторов (отличаются массой пиросостава), объемом газовых полостей, можно получать ударные спектры ускорений различной величины (от 100g до 10 000g и выше).

С помощью пиротехнических устройств можно проводить автономные испытания подсистем КА с высокими уровнями ударных воздействий, создавая необходимые ударные воздействия в различных точках подсистемы КА. Можно также проводить ис-

пытания динамических макетов КА (имитируя воздействия от ракеты – носителя, раскрытие солнечных батарей и т. д.) без срабатывания штатных устройств КА.

Основным недостатком таких устройств является невозможность их синхронизации при срабатывании газогенераторов (разброс при одновременной подаче напряжения может составлять до 10 мс). Возможен существенный разброс и величины амплитуды ударного воздействия. Но при проведении испытаний по методу ударных спектров ускорений, как правило, погрешности связанные с самим пиротехническим устройством находятся в пределах  $\pm 3$  дБ по амплитуде.

В докладе рассматриваются примеры ударных испытаний различных подсистем КА (солнечных батарей, антенн и т. д.) при автономных испытаниях, и сравнение их нагружения в составе динамических макетов КА.

#### Библиографические ссылки

1. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999. 308 p.
2. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003 may 18, 1999. 26 p.
3. ГОСТ Р53190. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра. М. : Стандартинформ, 2009. 24 с.
4. Adriano Calvi, "Spacecraft Loads Analysis" ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21, 2011. 126 p.
5. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.novatest.ru> (дата обращения: 10.08.2019).
6. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bpp.by/catalog/tira-shock-4110m> (дата обращения: 10.08.2019).

7. Круглов Ю. А., Туманов Ю. А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. Л. : Машиностроение, 1986. 222 с.

8. Пат. 2394217 РФ, МПК G01M 7/08. Пиротехническое устройство для создания ударных воздействий / Орлов С. А., Орлов А. С. Опубл. 10.07.2010, Бюл. № 19. 8 с.

#### References

1. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, January 15, 1999. 308 p.
2. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003 May 18, 1999. 26 p.
3. GOST R53190. Ispytaniya na udar s vosproizvedeniem udarnogo spektra. [Shock Spectrum Tests]. Moscow, Standartinform, 2009. 24 p.
4. Adriano Calvi, "Spacecraft Loads Analysis" ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21, 2011. 126 p.
5. Website [Electronic resource]. URL: <http://www.novatest.ru> (access: 10.08.2019).
6. Website [Electronic resource]. URL: <http://www.bpp.by/catalog/tira-shock-4110m> (access: 10.08.2019).
7. Kruglov Yu. A., Tumanov Yu. A. Udarovibrozaschita mashin, oborudovaniya i apparatury. [Shock vibration protection of machines, equipment and apparatus]. Leningrad, Mashinostroenie, 1986. 222 p.
8. Pat. 2394217 RF, MPK G01M 7/08. Pirotekhnicheskoe ustroystvo dlya sozdaniya udarnykh vozdeystviy [Pyrotechnic device for creating shock effects] / Orlov S. A., Orlov A. S. Publ. 10.07.2010. Bul. № 19, 8 p.

© Орлов С. А., Копытов В. И.,  
Матвеев К. А., 2019

УДК 678; 677.4; 621.791.35

## СРАВНЕНИЕ ПРИПОЕВ И ФЛЮСОВ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПАЙКИ МЕДНОЙ СЕТКИ

А. А. Савенков, А. В. Щербакова, Е. В. Рублевская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 14begemot@mail.ru

*Проведен сравнительный анализ режимов пайки, припоев и флюсов для медной сетки. Проведенный сравнительный анализ позволяет определить рациональный режим пайки, а также припой и флюс, способствующие снижению стоимости изделия и обеспечивающие качественный паяный шов.*

*Ключевые слова: режим пайки, припой, флюс, медная сетка, качественный паяный шов, композитные материалы.*

## COMPARISON OF BRAZING ALLOYS AND FLUXING MATERIALS FOR RATIONAL CONDITIONS OF COPPER MESH SOLDERING

A. A. Savenkov, A. V. Shcherbakova, E. V. Rublevskaja

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 14begemot@mail.ru

*The article analyzes soldering modes, brazing alloys and fluxing materials for soldering of copper mesh. The given comparative analysis allows to determine rational soldering conditions as well as brazing alloy and fluxing material contributing to cost reduction of products and providing soldered seam of high-quality.*

*Keywords: soldering mode, brazing alloy, fluxing material, copper mesh, soldered seam of high quality, composite material.*

Высокотехнологичные композитные материалы широко применяются в конструкции летательных аппаратах.

Композитные материалы, также известные как углепластик, получают путем соединения легкого полимерного вяжущего материала с наполнителем из диспергированного углеродного волокна, что позволяет получить материал с высокой удельной прочностью. В частности, из углепластика выполняются многие конструкции летательных аппаратов, что позволяет им выдерживать связанные с полетом нагрузки и сводит к минимуму общую массу летательного аппарата [1].

Однако, несмотря на высокую прочность и малый вес, углепластики обычно не проводят ток, что делает

их уязвимыми к повреждениям, вызванным ударом молнии. Для защиты изделий из полимерного композиционного материала от ударов молний применяют противомолниевую сетку. Сетку включают в конструкцию изделия при изготовлении. Схема слоев при изготовлении изделия из ПКМ представлена в [2] (см. рисунок).

Не редко, что изделие не стандартно, и для этого приходится паять сетку из несколько частей. Для качественной пайки сетки необходимо подобрать флюс и припой.

Сравнение припоев и флюсов представлено в таблице. Также при получении паяного шва высокого качества большую роль играет выбор рационального режима пайки [3].

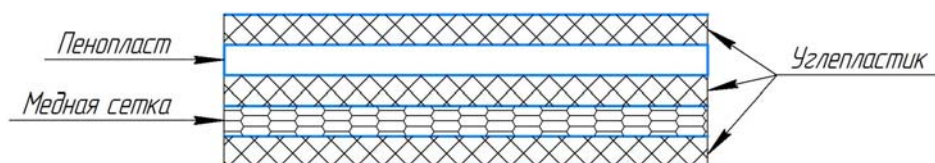


Схема укладки слоев для изделия из ПКМ

**Сравнение припоев и флюсов для рационального режима пайки**

Припой/ Флюс	Паяльная кислота	Ф38
FELDER «Massiv» Sn60Pb40	T = 310, ломались наконечники	T = 305, флюса хватает на длинные швы
FELDER ISO-Core RA Sn60Pb40	410, ломались наконечники, часто приходится чистить паяльник	400, часто приходится чистить паяльник
Asahi Solder Sn60Pb40	350, ломались наконечники	350

Опытным путем был выбран качественный режим пайки и к тому же способствующий к снижению стоимости изделия. Пайка медной сетки будет осуществляться с припоем FELDER «Massiv» и флюсов Ф38 при температуре равной в 305 градусов.

Таким образом, будет обеспечены функциональные характеристики изделия из ПКМ в течении всего срока их эксплуатации.

**Библиографические ссылки**

1. Официальный сайт COMSOL Group [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.ru/blogs/protecting-aircraft-composites-from-lightning-strike-damage/> (дата обращения: 25.08.2019).
2. Основы производства ЛА и АД : конспект лекций / А. Н. Ерошкин, Ю. Н. Макин и др. М. : МГТУГА, 88 с.

3. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1988. 376 с.

**References**

1. Official website of COMSOL Group [Electronic resource]. URL: <https://www.comsol.ru/blogs/protecting-aircraft-composites-from-lightning-strike-damage/> (access: 25.08.2019).
2. Osnovy proizvodstva LA i AD. Konspekt leksiy [Basics of manufacturing. Lecture notes] / A. N. Eroshkin, Y. N. Makin et al. Moscow, MGTUGA Publ., 88 p.
3. Lashko S. V., Lashko N. F. Payka metallov [Metal soldering]. Moscow, Machine-building Publ., 1988, 376 p.

© Савенков А. А., Щербакоева А. В., Рублевская Е. В., 2019



УДК 621.03

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА

А. А. Стукалов

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: stukalov.andrei2014@yandex.ru

*Выполнено проектирование элемента конструкции в различных вариантах с использованием генеративного дизайна. Проведен расчет на прочность. Применение генеративного дизайна позволит уменьшить массу элемента конструкции с сохранением прочностных параметров.*

*Ключевые слова: проектирование, генеративный дизайн, элемент конструкции, запас прочности.*

## DESIGN OF STRUCTURAL ELEMENTS IN ENGINEERING PRODUCTION WITH THE USE OF GENERATIVE DESIGN

A. A. Stukalov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: stukalov.andrei2014@yandex.ru

*The design of the structural element in different versions using generative design. The calculation of strength. The use of generative design will reduce the weight of the structural element while maintaining the strength parameters.*

*Keywords: design, generative design, structural element, safety margin.*

Проблема создания оптимальных современных конструкций неразрывно связана с технологиями проектирования. Набирает популярность технология проектирования – генеративный дизайн. Идея этой технологии в том, чтоб не проектировать заново продукт, а задать нужные параметры и ограничения на основе синтеза природных форм. В результате получают интересные варианты конструкций. На рис. 1 показаны примеры конструкций с использованием генеративного дизайна [1–2].

Генеративный дизайн связан с топологической оптимизацией. Смысл ее прост: у детали убирается лишний материал с ориентацией на аддитивные производства (3D-печать). С помощью 3D-печати можно изготовить элементы с любыми толщинами, искривлениями, сетчатой и ячеистой структурой. Применяется в сферах, где необходимо сэкономить каждый грамм (авиастроение, космическая отрасль). В результате применения генеративного дизайна можно сэкономить около 30 % дорогих металлов и сплавов.

Другое название генеративного дизайна это бионический дизайн (бионика – наука о применении в технических устройствах структур и свойств живой природы). Источником вдохновения были природа и математика [3]. Решение задачи не бионическим путем, не способны в полной мере решить задачи проектирования и изготовления. Без использования бионического проектирования это задачи не выше автоматизации станочных линий по жестко ограниченными программам.

Рассмотрим несколько вариантов конструктивного элемента стойки. Варианты показаны на рис. 2. Данный конструктивный элемент может быть применен в машиностроительном производстве. А именно в авиационно-космической отрасли, автомобилестроении, также в строительстве. На основе геометрических моделей были построены конечно-элементные модели (КЭМ) и произведен расчет на прочность [4; 5]. КЭМы показаны на рис. 3.

Закрепление стоек осуществлялось одинаково для всех вариантов. Нагрузка прикладывалась одинаковая. Материал один и тот же для всех вариантов.

Вариант № 1 (рис. 2) имеет самую большую массу из представленных вариантов. Вариант № 4 с самой низкой массой. Вариант № 3 приближен к варианту № 4 по массе. Расхождения по массе между 1 и 4 вариантом составляет 35,8 %.

Коэффициент запаса прочности для предложенных вариантов больше 1.

По результатам расчета на прочность видно, что спроектированные варианты стойки показывают хорошие результаты, а именно вариант № 4 по прочности. При этом в результате применения генеративного дизайна удалось уменьшить массу элемента на 35,8 %.

Проектирование элементов конструкций в машиностроительном производстве с использованием генеративного (бионического) дизайна позволяет уменьшить массу элементов конструкций с сохранением запаса прочности.



Рис. 1. Примеры конструкций с использованием генеративного дизайна

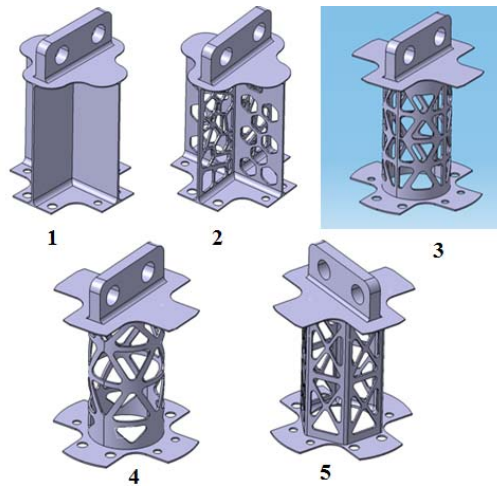


Рис. 2. Геометрические модели стоек с применением генеративного дизайна

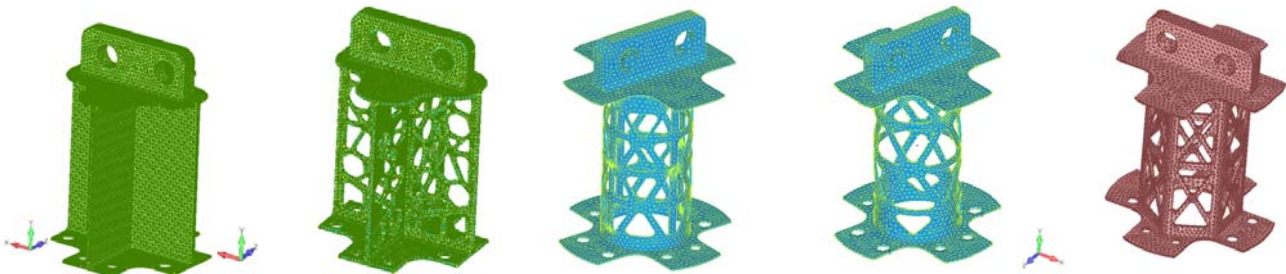


Рис. 3. Конечноэлементные модели вариантов стойки

#### Библиографические ссылки

1. Грек А. Генеративный дизайн // Популярная механика. 2019. № 3.
2. Новое в «генерации» проектов? // Сибирский спутник. 2019. № 10 (467). С. 8.
3. Лебедев Ю. С., Рабинович В. И. Архитектурная бионика. М. : Стройиздат, 1990. 269 с.
4. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with Nastran. М. : ИТ Пресс, 2013. 552 с.
5. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC Nastran for Windows. М. : ДМК Пресс, 2003. 448 с.

#### References

1. Greek A. Generative design // Popular mechanics. 2019. № 3.
2. New in “generating” projects? // Siberian satellite. 2019. № 10 (467). P. 8.
3. Lebedev Y. S., Rabinovich V. I. Architectural bionics. Moscow, Stroizdat, 1990. 269 p.
4. Rychkov S. P. Modeling of structures in Femap with Nastran environment. Moscow, NT Press, 2013. 552 p.
5. Shimkovich D. G. Calculation of structures in MSC Nastran for Windows. Moscow, DMK Press, 2003. 448 p.

© Стукалов А. А., 2019

УДК 621.9.06

## РАЗРАБОТКА МЕХАНИЧЕСКОГО УЧАСТКА С ЧПУ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ НАЗЕМНОЙ АНТЕННЫ

В. С. Терехина, А. В. Фищенко, А. И. Рудич, В. А. Лисин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: terekhina1981@list.ru

*Представлены основные проблемные аспекты применения ЧПУ для создания сборочных единиц антенн. Описаны вопросы требований к точности наземных антенн для нужд ракетно-космической техники, представлены проблемы достижения представленных требований возможностями современных ЧПУ без больших затрат времени и человеческого фактора.*

*Ключевые слова: наземные антенны, ЧПУ (числовое программное управление), сборочные единицы, механическая обработка, механический участок.*

## DEVELOPMENT OF A CNC MECHANICAL AREA FOR THE MANUFACTURE OF ASSEMBLIES OF THE GROUND ANTENNA

V. S. Terekhina, A. V. Fischenko, A. I. Rudich, V. A. Lisin

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: terekhina1981@list.ru

*The article presents the main problematic aspects of the use of CNC to create antenna assembly units. The paper describes the requirements for the accuracy of ground-based antennas for the needs of rocket and space technology, presents the problems of achieving the requirements presented by the capabilities of modern CNCs without much loss of time and human factor.*

*Keywords: ground antennas, CNC (numerical control), assembly units, machining, mechanical section.*

**Введение.** Проектирование современных авиационных конструкций осуществляется с помощью компьютерных интегрированных технологий CAD/CAM/CAE, а изготовление значительной части деталей производится с использованием оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). Однако монтаж и наладка сборочной оснастки происходит вручную и составляет около 40 % от общих трудозатрат при изготовлении антенн.

Значительный удельный вес при выполнении сборочных работ составляют затраты на операции взаимной координации деталей и узлов при их установке (базировании и фиксации) в сборочном положении, а также затраты на соединение составных частей конструкции, изготовление оснастки второго порядка и т. п.

Эти затраты во многом определяются значительным объемом ручных работ и зависят от особенностей конструкции, уровня технологичности, принятой схемы членения, схемы и методов сборки, методов обеспечения взаимозаменяемости. Рост объемов выпуска изделий достигается в основном путем расширения фронта работ и увеличения численности рабочих, занятых в сборочном производстве [4, с. 46].

Аналогично и наземные антенны, задействованные в этой сфере, требуют для себя сложных решений для изготовления сборочных единиц, которые и задействуют большое количество ручного труда, тормозя производство, увеличивая прости техники с ЧПУ.

**Основная часть.** Применение станков с ЧПУ особенно эффективно при обработке деталей сложной конфигурации, имеющих большое количество карманов, выборок, рёбер, сложных фасонных поверхностей. Представителями таких деталей в авиастроении являются стрингеры, панели, нервюры, стойки, кронштейны, фитинги и т. д. Современные станки с ЧПУ позволяют выполнять обработку с точностью IT6-IT8. В то же время снижается скорость производства, длительные простои, настройка оборудования, избирательные подходы к производству сборочных единиц [1, с. 37].

Использование станков с ЧПУ позволяет получить детали заданной сложной формы с практически любой необходимой точностью. Одними из таких деталей являются монолитные фрезерованные панели переменной толщины. В тоже время состояние меняется при производстве сборочных единиц.

Малейшие погрешности обработки поверхности (заусенцы, царапины и проч.) могут привести к образованию концентраторов напряжений, впоследствии – трещин, и в дальнейшем вызвать разрушение детали и всего аппарата. Этого допускать нельзя. Сборочные единицы же требуют человеческого фактора на этапе сопряжения составных деталей, нередко требуемая точно не может гарантироваться со достаточной верностью. [3, с. 65].

В то же время процесс требует высокого уровня геометрической точности и минимизации неточностей и ошибок по вине «человеческого фактора».

К антеннам исследуемой сферы предъявляются требования по обеспечению необходимых радиотехнических характеристик, при этом они должны обладать наименьшей массой и соответствовать требованиям по жесткости и прочности.

Основными параметрами волноводов являются высокая точность размеров и высокий класс обработки внутренних поверхностей. Выполнение этих условий при изготовлении волноводов обычными методами (литье, механическая обработка) связано с большими затратами труда, а зачастую и недостижимо, особенно если каналы имеют изогнутую или скрученную форму, а также переход от одного вида сечения к другому, что требует применения ЧПУ [2, с. 135].

Далее опишем основные требования к самому участку в контексте применения ЧПУ.

ЧПУ оборудование на таком предприятии должно быть самым новым и самым точным. Оно должно быть способно производить всевозможные манипуляции, как на макро, так и на микроуровнях производства.

Прежде всего, любое предприятие связи должно иметь дорогостоящее программное обеспечение для ЭВМ, представляющее собой сложную систему автоматизированного проектирования любой разрабатываемой продукции, которое обойдется предприятию в несколько сотен тысяч рублей. Кроме этого, для производства самих металлических элементов радио и видео антенн необходимо использовать надежные фрезерные станки с числовым программным управлением, стоимость которых варьируется в зависимости от габаритов продукции, а именно начинается от нескольких миллионов для крупных антенн. [5, с. 28].

Количество станков придется определять, исходя из размеров вашего производства и занятости специалистов на нем, для начала часто это от 10 малогабаритных станков и 1–3 крупных.

Учитывая, что стоимость станко-часа работы станка с ЧПУ в несколько раз выше, чем универсального станка, крайне важно сократить подготовительно-заключительное и вспомогательное время. Это достигается за счет механизации приспособлений для установки деталей. Очень важно применять станки большого масштаба, человеческий фактор рекомендуется не уменьшать до чрезмерно малого уровня. Сборочные единицы предлагается формировать с несколькими этапами проверки и доработки в связи с высоким уровнем требуемой точности и надёжности. Из основных особенностей: обработку с горизонтально-протяжного станка целесообразно перенести на токарный станок, а обработку произвести не протяжкой, а развёрткой.

**Заключение.** С начала освоения космоса антенные системы для ракетно-космической отрасли – это сложные высокотехнологичные изделия, которые были штучными и создавались под каждый космический аппарат. В современных условиях единичное и мелкосерийное производство неэффективно, поэтому требуются новые подходы в проектировании и произ-

водстве антенных систем для уменьшения издержек и увеличения стабильного качества применяя для этого возможности механического участка с ЧПУ.

Основными параметрами при производстве наземных антенн являются высокая точность размеров и высокий класс обработки внутренних поверхностей. Выполнение этих условий при изготовлении волноводов обычными методами (литье, механическая обработка) связано с большими затратами труда, а зачастую и труднодостижимо, особенно если каналы имеют изогнутую или скрученную форму, а также переход от одного вида сечения к другому, что требует применения ЧПУ.

### Библиографические ссылки

1. Коршунов А. И. Исследование конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия // *Фундаментальные исследования*. 2006. № 11. С. 36–37.
2. Моисеева Л. Т., Хуснутдинов Р. Р. Комплексная оптимизация механических операций при изготовлении сложных деталей // *Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2013»* : Междунар. научно-технич. конф. : сборник докладов / Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева. 2013. С. 133–140.
3. Пудовкин А. П., Панасюк Ю. Н., Иванков А. А. Основы теории антенн : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2011. 92 с.
4. Стенин Ю. М. Антенны и антенные системы. Казань : КГУ, 2012.
5. Яблочников Е. Е., Молочник В. И., Гусельников В. С. Метод разработки групповых технологических процессов для оборудования с числовым программным управлением // *Приборостроение*. 2010. № 6.

### References

1. Korshunov A. I. Study of structural and technological complexity of machine-building products // *Fundamental research*. 2006. № 11. P. 36–37.
2. Moiseeva L. T., Khusnutdinov R. R. Complex optimization of mechanical operations in the manufacture of complex parts // *Problems and prospects of aviation, land transport and energy "ANTE-2013"* : international scientific and technical conference: collection of reports. Kazan state technical University. A. N. Tupolev. 2013. P. 133–140.
3. Pudovkin A. P. fundamentals of the theory of antennas : a tutorial / A. P. Pudovkin, Y. N. Panasyuk, A. A. Ivankov. Tambov : Publishing house TSTU, 2011. 92 p.
4. Stenin Yu. M. Antennas and antenna systems. Kazan : KSU, 2012
5. Apple E. E., Milkman V. I. Guselnikov V. S. a Method of developing group processes for equipment with numerical control Instrumentation. 2010. № 6.

© Терехина В. С., Фищенко А. В., Рудич А. И., Лисин В. А., 2019

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В. В. Тимофеев, В. А. Нестеров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: VT-ak@yandex.ru

*Рассматривается расчет трехслойной параболической оболочки с сотовым наполнителем и композитными несущими слоями, находящейся в условиях зонального температурного воздействия. Интенсивность деформирования определяется по среднеквадратическому отклонению теоретического профиля при локальном нагревании отдельных зон поверхности зеркала антенны.*

*Ключевые слова: параболическая антенна, композитная оболочка, метод конечных элементов.*

## THE DEFORMATION OF A COMPOSITE PARABOLIC ANTENNA UNDER LOCAL THERMAL LOADING

V. V. Timofeev, V. A. Nesterov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: VT-ak@yandex.ru

*The static analyses of a sandwich parabolic shell with a honeycomb core and composite carrier layers under conditions of zonal temperature exposure is considered. The strain rate is determined by the standard deviation of the theoretical profile with local heating of certain areas of the surface of the antenna mirror.*

*Keywords: parabolic shell, composite shells, finite element method.*

**Введение.** Композиционные материалы часто используются в производстве ракетно-космической техники (РКТ). Обладая высокими удельными механическими характеристиками, они позволяют изготавливать конструкции с более высокой степенью весового совершенства, чем аналоги из традиционных конструкционных материалов [1]. Параболические антенны космических аппаратов в условиях космоса испытывают сложные термические воздействия. Часть антенны находится в зоне интенсивного солнечного нагрева, в то время как затененная часть может значительно охлаждаться. Это приводит к деформированию антенн и искажению теоретического профиля параболоида. Степень искажения оценивается по среднеквадратическому отклонению (СКО) зеркала антенны от теоретического профиля. Уменьшения этого показателя можно достичь при рациональном армировании стенки композитной оболочки.

В последние годы для изготовления элементов РКТ часто применяются трехслойные панели и оболочки с сотовым наполнителем и композитными несущими слоями. Они отличаются большей изгибной жесткостью, чем сплошные композитные оболочки.

В настоящей работе рассматривается трехслойная параболическая антенна, находящаяся в условиях сложного термического нагружения. Один сектор поверхности зеркала ( $45^\circ$ ) нагревается потоком солнечной радиации до  $75^\circ\text{C}$ , а противоположный ему сектор ( $45^\circ$ ) находится в тени и охлажден до  $-150^\circ\text{C}$ .

**Численное исследование.** Моделирование и расчет выполнены в среде пакета конечно-элементарных программ COSMOS/M с использованием четырех узлового элемента слоистой оболочки SHELL4L [2]. Конечно-элементная модель антенны с жестким закреплением полюса представлена на рис. 1. Схема армирования стенки оболочки показана на рис. 2. Несущие слои симметричны относительно срединной поверхности. Ортоотропия механических свойств оболочки обеспечена чередованием слоев с углами ориентации волокна  $+\varphi$  и  $-\varphi$ .

Проведен численный эксперимент для оценки влияния углов армирования на деформативность параболической антенны при локальном нагревании. Проведен ряд статических расчетов оболочки при термическом нагружении для нескольких значений углов ориентации углепластиковых волокон в несущих слоях ( $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ).

Отклонение теоретического профиля оценивалось по значениям полных узловых перемещений. На рис. 3 представлено поле перемещений для модели с углом ориентации  $\varphi = 30^\circ$ . По величинам полных узловых перемещений рассчитывались СКО, значения которых представлены в таблице. Они свидетельствуют о том, что деформация антенны при локальном нагреве зеркала сложным образом зависит от схемы армирования несущих слоев. Оптимальным в нашем случае является угол армирования волокон в  $15^\circ$  (модель с  $\varphi = 0^\circ$  практически не реализуется).

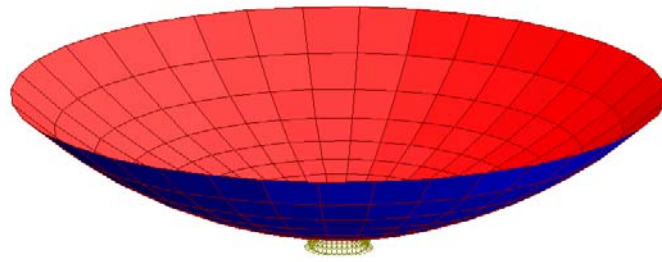


Рис. 1. Параболическая антенна

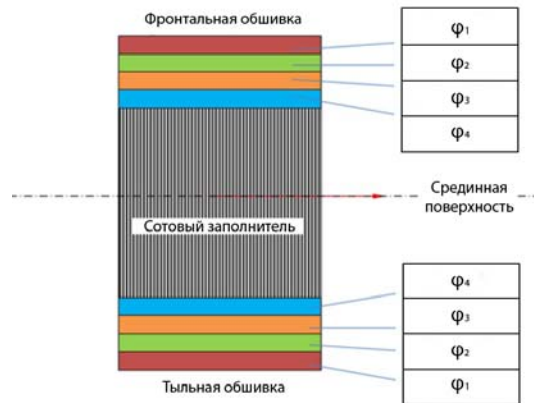


Рис. 2. Схема армирования стенки

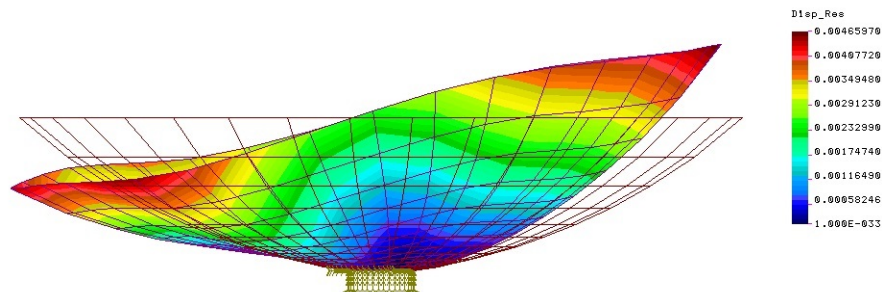


Рис. 3. Картина деформирования антенны

**СКО при разных схемах армирования**

Схема армирования несущих слоев				СКО, м
$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	
0°	0°	0°	0°	5,09E-05
15°	-15°	15°	-15°	5,74E-05
30°	-30°	30°	-30°	6,65E-05
45°	-45°	45°	-45°	7,3E-05
60°	-60°	60°	-60°	7,27E-05
75°	-75°	75°	-75°	6,73E-05
90°	-90°	90°	-90°	6,25E-05

Это обусловлено влиянием продольной изгибной жесткости  $D_{11}$  [3], которая имеет наибольшее значение

при маленьких значениях углов наклона волокон к образующей параболоида.

Уменьшение СКО модели с  $\varphi = 90^\circ$  объясняется наибольшим значением окружной мембранной жесткости  $B_{22}$ , препятствующей «раскрытию» оболочки.

**Вывод.** В результате численного эксперимента обнаружено значительное влияние углов армирования несущих слоев трехслойной параболической антенны на жесткость конструкции и на прогиб оболочки при локальном термическом нагружении. Выполнение представленного исследования целесообразно на этапе проектировочных расчетов для определения оптимальных значений проектных параметров, обеспечивающих работоспособность антенн в оптимальном состоянии.

### Библиографические ссылки

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композитных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с.
2. Нестеров В. А., Лопатин А. В. Конечно-элементное моделирование пространственных конструкций: учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. 144 с.
3. Лопатин А. В., Нестеров В. А. Механика слоистых композитных пластин: учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 120 с.

### References

1. Vasiliev V. V. Mechanics of structures from composite materials. Moscow, Mechanical Engineering, 1988. 272 p.
2. Nesterov V. A., Lopatin A. V. Finite-element modeling of spatial structures : textbook. allowance / Sib. state aerospace Univ. Krasnoyarsk, 2007. 144 p.
3. Lopatin A. V., Nesterov V. A. Mechanics of layered composite plates : textbook. allowance / Sib. state aerospace Univ. Krasnoyarsk, 2008. 120 p.

© Тимофеев В. В., Нестеров В. А., 2019

УДК 621.315.328

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ БКС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Д. Е. Хафизов<sup>1</sup>, В. В. Казанцев<sup>1</sup>, А. П. Леонов<sup>1</sup>, С. В. Ефремов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

Российская Федерация, 634050, г. Томск, ул. Ленина, 30

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

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

E-mail: deh5@tpu.ru

*Разработаны рекомендации по определению сопротивления токопроводящих жил кабельных изделий в условиях, имитирующих работу в космическом пространстве. Данный подход позволяет определить степень изменения электрофизических свойств кабельных изделий в условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации.*

*Ключевые слова: бортовая кабельная сеть, токопроводящая жила, космический аппарат.*

## THE ELECTRICAL PARAMETERS DETERMINATION OF ON-BOARD CABLES HARNESS UNDER INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

D. E. Khafizov<sup>1</sup>, V. V. Kazantsev<sup>1</sup>, A. P. Leonov<sup>1</sup>, S. V. Yefremov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk National Research Polytechnic University

30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation.

<sup>2</sup>Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”

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

E-mail: deh5@tpu.ru

*Developed recommendations for determining resistance of cable wires in simulation space conditions. Recommendations on the electrophysical properties on-board cables determination under influence of external factors are received.*

*Keywords: on-board cable network, conductor, spacecraft.*

Современная космическая отрасль не может существовать без надежной работы космических аппаратов (КА) в открытом космосе. В состав КА входят бортовая аппаратура, различное оборудование и устройства. Для объединения в единую систему бортовой аппаратуры, с целью обеспечения электрической связи, служит бортовая кабельная сеть (БКС), обеспечивающая выполнение изделием поставленных задач в заданных условиях. БКС должна быть стойкой к воздействию внешних воздействующих факторов: вакуума, космической радиации, а также резкого перепада температур [1]. Основной составляющей частью БКС являются провода, состоящие из двух основных элементов: токопроводящей жилы (ТПЖ) и полимерной изоляции [2]. Для бесперебойной работы КА данные элементы должны сохранять свои основные параметры (удельное сопротивление, электрическая и механическая прочность и т. д.) [3] в условиях воздействия внешних факторов [4]. Экспериментальная проверка этих параметров является обязательной на всех стадиях проектирования и изготовления космического аппарата.

Для достижения поставленных задач было принято решение разработать методику определения удель-

ного сопротивления ТПЖ с учетом цикличности изменения температуры и давления. Экспериментальное определение производится на термовакуумной установке, представляющей собой герметичную камеру для создания вакуума [5] (рис. 1) и блока управления. Управление осуществляется с помощью специально разработанной программы (интерфейс пользователя показан на рис. 2).

Во время выполнения работ испытывались кабельные изделия (КИ) с медными и алюминиевыми ТПЖ.

Отработка методики проводилась в температурных пределах от минус 50 до плюс 50 °С в вакууме. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Произведенная расчетная оценка удельного сопротивления ТПЖ по выражению (1) показала удовлетворительную сходимость результатов с опытными данными.

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20 \text{ } ^\circ\text{C})], \quad (1)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление материала при 20 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $t$  – температура окружающей среды.





Рис. 1. Общий вид термовакуумной установки

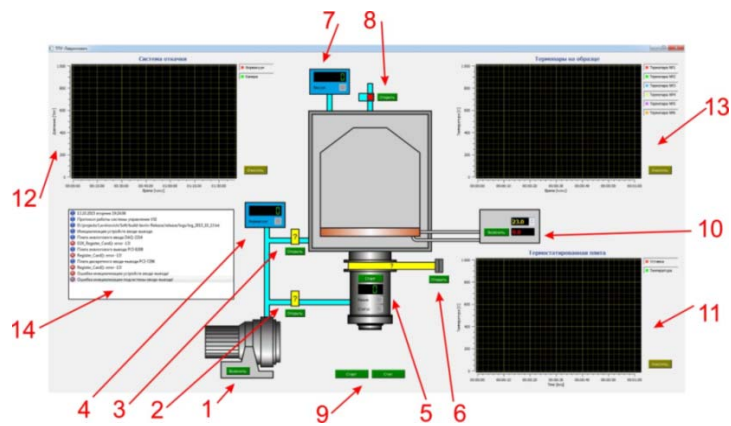


Рис. 2. Интерфейс пользователя программы управления экспериментом

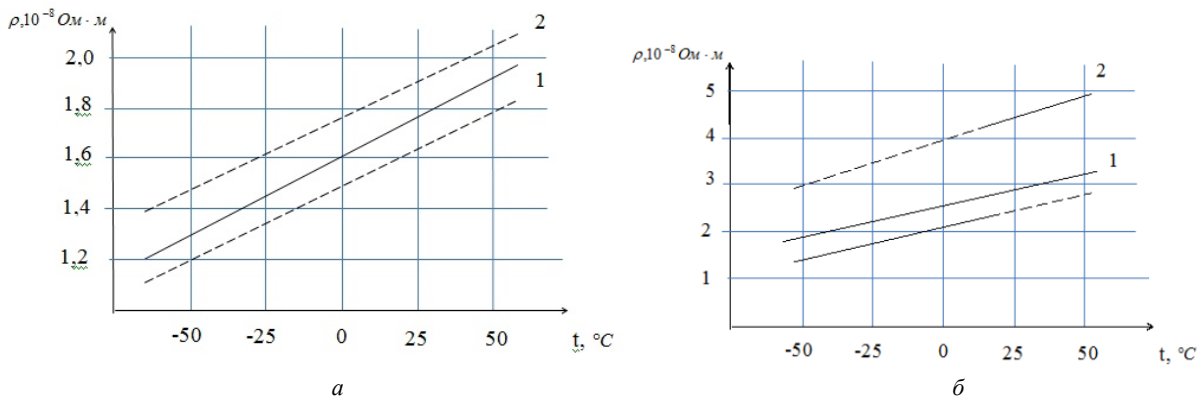


Рис. 3. Графическая зависимость изменения сопротивления образец с медной (а) и алюминиевой (б) ТПЖ: расчетные (1) и экспериментальные (2) значения

Таким образом, данная методика позволяет определить изменение сопротивления  $R_{ТПЖ}$  в широком интервале температур в вакууме. Это позволяет выявить наилучший тип КИ для БКС КА. В дальнейшем планируется увеличить номенклатуру испытуемых образцов, увеличить диапазон температур, при которых проводят измерения. Существуют предпосылки для расширения перечня определяемых характеристик КИ (емкость, индуктивность и т. д.).

#### Библиографические ссылки

- ГОСТ Р 56530–2015. Совместимость космической техники. Электромагнитная. Общие требования к бортовой кабельной сети космической техники. Введ. 2016-01-01. М. : Стандартинформ, 2016. 17 с.
- Ефремов С. В., Игнатъев Д. В., Леонов А. П. Принципы создания низкочастотной бортовой кабельной сети // Электронные и электромеханические системы и устройства : научно-техническая конфе-

рениция молодых специалистов // АО «НЦП «Полнос». Томск, 2018. С. 22–24.

3. ГОСТ 22483–77. Жилы токопроводящие медные и алюминиевые для кабелей, проводов и шнуров. Основные параметры. Технические требования. Введ. 1980-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1983. 42 с.

4. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Metodicheskie-ukazaniya/Kosmicheskoe-prostranstvo-i-ego-vliyanie-na-elementy-konstrukcii-kosmicheskikh-apparatov-Elektronnyi-resurs-elektron-metod-posobie-k-prakt-rabotam-53227/.pdf> (дата обращения 15.9.2019).

5. Курашов В. И., Фомина М. Г. Вакуумная техника: средства откачки, их выбор и применение : учеб. пособие / под ред. проф. Г. Х. Мухамедзянова / КГТУ. Красноярск, 1997. 57 с.

### References

1. GOST R 56530–2015. Sovmestimost' kosmicheskoy tekhniki. Elektromagnitnaya. Obshchie trebovaniya k bortovoy kabel'noy seti kosmicheskoy tekhniki [Compatibility of space technology. Electromagnetic. General requirements for the onboard cable network of space technology]. Introduced. 2016-01-01. Moscow, Standartinform, 2016. 17 p.

2. Efremov S. V., Ignat'ev D. V., Leonov A. P. [Principles of creating a low-frequency on-Board cable

network] // Elektronnyye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva : Nauch. konf. molodykh spetsialistov / AO «NTsP «Polyus», [Scientific and technical conference of young specialists «Electronic and Electromechanical systems and devices»]. Tomsk, 2018. P. 22–24.

3. GOST 22483–77. Zhily tokoprovodyashchie mednye i alyuminievye dlya kabeley, provodov i shnurov. Osnovnye parametry. Tekhnicheskie trebovaniya. [Conductors copper and aluminum for cables, wires and cords. Main parameters. Specifications]. Introduced. 1980-01-01. Moscow, Publishing standards, 1983. 42 p.

4. Kosmicheskoe prostranstvo i ego vliyanie na elementy konstruksiy kosmicheskikh apparatov [Elektronnyy resurs]. URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Metodicheskie-ukazaniya/Kosmicheskoe-prostranstvo-i-ego-vliyanie-na-elementy-konstrukcii-kosmicheskikh-apparatov-Elektronnyi-resurs-elektron-metod-posobie-k-prakt-rabotam-53227/.pdf> (accessed 15.9.2019).

5. Kurashov V. I., Fomina M. G. Vakuumnaya tekhnika: sredstva otkachki, ikh vybor i primeneniye : ucheb. posobie / pod red. prof. G. Kh. Mukhamedzyanova. [Vacuum technology: pumping tools, their selection and application / edited by Professor G. H. Muhamedzjanov.] / KGTU. Krasnoyarsk, 1997. 57 p.

© Хафизов Д. Е., Казанцев В. В.,  
Леонов А. П., Ефремов С. В., 2019



**Секция**

**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ  
ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

УДК 629.78

## PROSPECTS OF APPLICATION OF SHAPE MEMORY POLYMERS IN THE SPACE INDUSTRY

O. A. Iseeva

Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: olena.chernova@yandex.ru

*Intelligent materials have found a growing interest in recent decades. SMP have the ability to change their shape in response to an external impulse, which actualizes their use in the space industry, as they exhibit higher rigidity with a low density in comparison with other materials*

*Keywords: shape memory polymer, smart materials, self-healing, glassy state, viscoelastic state, damping, sandwich panel.*

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИИ

О. А. Исеева

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: olena.chernova@yandex.ru

*В течение последних десятилетий можно наблюдать растущий интерес к классу интеллектуальных материалов. Полимеры с памятью формы имеют способность изменять свою форму в ответ на внешний импульс, что актуализирует их использование в космической среде, поскольку они демонстрируют более высокую жесткость с низкой плотностью по сравнению с обычными материалами*

*Ключевые слова: полимер с памятью формы, умные материалы, самовосстановление, упруготвердое состояние, вязкоэластичное состояние, демпфирование, сэндвич-панель.*

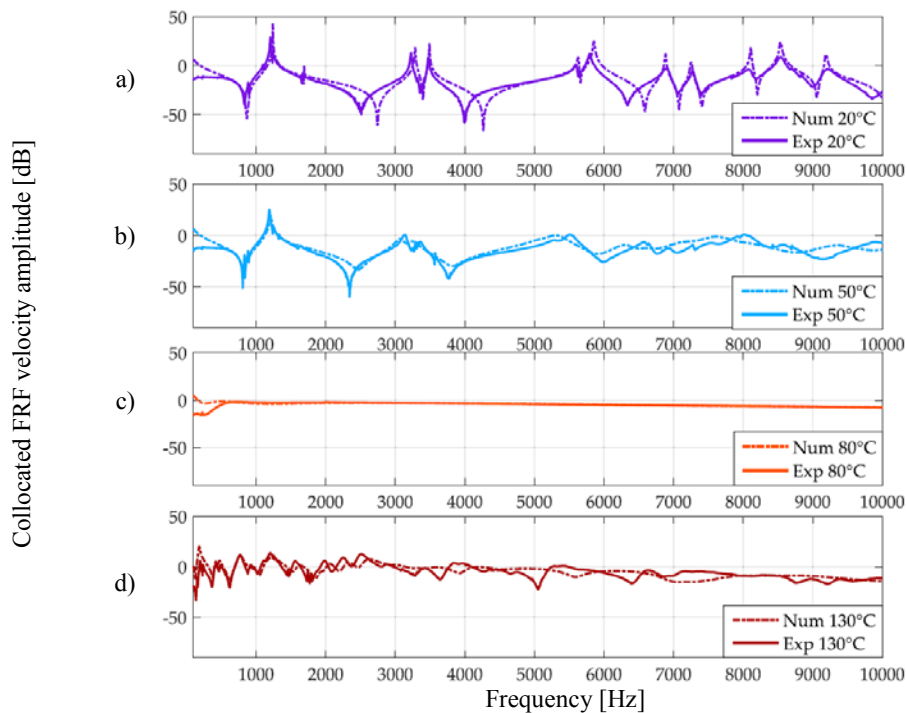
In recent years, the introduction of intelligent materials into the construction of spacecraft has become increasingly widespread. The dominant feature of smart materials is the "shape memory effect". This effect is that the materials mentioned after the forced change of shape can restore the original shape as a result of the return of the original physical state.

The specific features of the thermomechanical behavior of shape memory polymers (SMP) are associated with the presence of a relaxation transition: glass transition upon cooling and softening upon heating. In the highly elastic state, the polymer macromolecules have a high segmental mobility, which can be a reason of large reversible deformations. During glass transition, the mobility of molecular segments is significantly reduced. Firstly, this leads to an increase in the rigidity of the material: the Young's modulus of many polymers increases by two orders of magnitude. Secondly, it allows to keep the deformation created in the highly elastic state. When deforming a highly elastic material, the macromolecule segments occupy a new equilibrium position, and after cooling with the subsequent removal of the load, they no longer have enough freedom to return to their original state. Moreover, if there are a sufficient number of crosslinks between the macromolecules ensuring their position relative to each other, then in the process of subsequent heating, the undeformed form is restored [1].

SMP have a wide range of applications, such as drives, electromechanical systems, space structure conversion and deployment, self-healing, etc. The use of composite materials in the aerospace industry is increasing, as they have higher rigidity and lower density compared to conventional materials. However, they usually have low dynamic performance due to their high stiffness and low damping characteristics. Thus, the central problems are control and reduction of noise and vibrations. A lot of research has focused on composite structures made of viscoelastic materials to ensure the attenuation of vibration [2–4]. Many studies have been conducted to optimize the design of multilayer structures by changing the thickness of the viscoelastic layer, the orientation of the fiber, or the aspect ratio of the structure.

In work [5], the amazing ability of polymer shape-damping is emphasized by using it in multilayer structures, such as sandwich panels. These capabilities are verified in the simulation of finite elements, and also experimentally.

The ability of a FEM using temperature-time superposition to represent the behavior of a sandwich is tested. The wide range of frequencies and temperatures was investigated in experiment and simulation, the results shown in the Figure *a–d* demonstrate the impressive damping properties of the composite sandwich.



Experimental results “Exp” and simulation results “Num” at 20 °C, 50 °C, 80 °C and 130 °C

In Figure *a*, the correlations at 20 °C can be observed. The main trends of the dynamics are estimated by the model, even if some discrepancies appear. In the very low frequency range and at anti-resonances, the main differences are mostly due to the boundary conditions. A focus on the resonances shows that the relative distance between numerical and experimental fundamental frequencies is less than 1 % at 20 °C.

These errors on the damping properties can be explained by the large uncertainties on the aluminum and SMP loss factor values implemented in the FEM at 20 °C.

A good correlation between the model and the experiments at 50 °C can be observed in Figure *b*. The relative distance between numerical and experimental Eigen frequencies is less than 3 % at 50 °C and the damping properties is better estimated because the SMP loss factor is higher, hence the global damping is less affected by the aluminum’s loss factor.

Figure *c* illustrates once again the impressive damping capabilities of the SMP, which smooths all resonances. At this temperature, the correlation between the model and the experiments is excellent. As explained above, the difference in the very low frequency range is due to the boundary conditions.

Figure *d* shows that the model correlates quite well with the experiments at 130 °C, despite of the quite complex mode shapes which are due to the very low stiffness of the core. Comments and conclusions are identical to those given at 50 °C.

The technique proposed in article [5] can be applied to any viscoelastic material exhibiting frequency and temperature-dependent properties with high damping.

SMP have been known for decades. The cycle of the shape memory includes the steps of creating a “frozen” deformed state during cooling, unloading and the original shape recovery during heating. SMP have the ability to change their shape in response to an external impulse, most often thermal activation. When the SMP are heated above the glass transition temperature  $T_g$ , they will be soft, elastic and easy to change. If the SMP are cooled below  $T_g$  after that, they will retain the desired shape (shape fixing characteristic). When the SMP are heated above  $T_g$  again, they will autonomously return to their original permanent form. Today, smart materials are increasingly used for quasi-static and dynamic states in various temperature ranges, which requires thorough research of material properties in wide frequency and temperature ranges.

The tools to influence the shape recovery character are the variation of the cooling / heating rate, the amount of applied deformation, the exposure time at different stages and incomplete cooling and heating (so that the glass transition process is incomplete). In this regard, in many works SMP are considered in terms of programming their properties at the recovery stage.

## References

1. Tihomirova K. A., Trufanov N. A. [Experimental substantiation of the determining relationships for a shape memory amorphous polymer at large deformations] // *Vestnik PNIPU. Mehanika*. 2015. № 2. P. 151–163 (In Russ).
2. Hogsberg J. B. Explicit solution for the natural frequency of structures with partial viscoelastic treatment [Electronic resource] // *Mechanics of Advanced Materials*

and Structures. 2016. Vol. 23, № 7. P. 784–790. URL: [http://orbit.dtu.dk/files/127799172/hogsberg\\_2016\\_viscoelastic\\_frequency\\_postprint.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/127799172/hogsberg_2016_viscoelastic_frequency_postprint.pdf) (access: 12.08.2019).

3. Grootenhuis P. The control of vibrations with viscoelastic materials [Electronic resource] // *Journal of Sound and Vibration*. 1970. Vol. 11. № 4. P.421–433. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X70800049#aep-article-footnote-id1> (access: 12.08.2019).

4. Aumjaud P. A novel viscoelastic damping treatment for honeycomb sandwich structures [Electronic resource] // *Composite Structures*. 2015. Vol. 119.

P. 322–332. URL: <https://clck.ru/EHdGW> (access: 12.03.2019).

5. Pauline Butaud, Emmanuel Foltete, Morvan Ouisse. Sandwich structures with tunable damping properties: On the use of Shape Memory Polymer as viscoelastic core [Electronic resource] // *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. P. 401–408. URL: [www.elsevier.com/locate/compstruct](http://www.elsevier.com/locate/compstruct) (access: 12.03.2019).

© Исева О. А., 2019

## COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER BODY STRUCTURES OF MODERN NON-SEALED SATELLITES

O. A. Iseeva

Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: olena.chernova@yandex.ru

*The types of the central tube, the comparative analysis between the classical structure of honeycomb panels, monolithic and mesh construction, as well as highlighting their principal features.*

*Keywords: spacecraft, central tube, anisogrid body tube, grid structure, composite materials, spiral ribs, honeycomb.*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ СПУТНИКОВ

О. А. Исеева

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: olena.chernova@yandex.ru

*Рассмотрены виды центральной трубы, проведен сравнительный анализ между классической конструкцией из сотовых панелей, монолитной и сетчатой конструкцией, а также выделены их принципиальные особенности.*

*Ключевые слова: космический аппарат, центральная труба, анизогридная силовая труба, сетчатая конструкция, композиционные материалы, спиральные ребра, сотовый наполнитель.*

A modern spacecraft is a technically complex object which consists of functional systems and subsystems. One of them is the subsystem of construction. The construction of a spacecraft includes parts, assemblies, assembly units, aggregated to ensure the specified characteristics [1].

The main power element of the Russian and foreign unpressurized satellites' construction is the central tube, made in the form of a hollow cylindrical compartment for accommodating and installation equipment and structural elements of the spacecraft.

Central tube can be represented in the following configurations [2]:

1) The classic design of the honeycomb sandwich panel.

The central tube's sandwich panel consists of composite skins with aluminum honeycomb core between them. Installing inserts for fixing equipment and structural elements into the panel is more capital-intensive, time-consuming and time-consuming operation than installing inserts into the monolithic structure.

2) Monolithic structure.

Central tube of this type is made of composite skins without the use of honeycomb core. This design allows to install the insert easily and quickly, even in the later stages of manufacture.

3) Mesh design.

A central tube of this type is represented as an anisogrid power tube (APT), which includes an APT

body, made in the form of a spatial mesh structure made of composite materials, and interfaces for equipment and structural elements of spacecraft placement and installation.

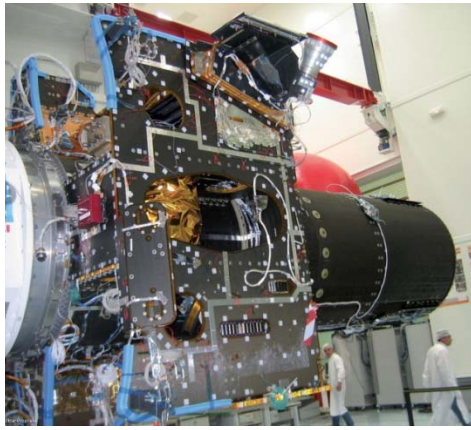
The principal feature of the first two configurations is that the load is mainly perceived by the skin, and the core provides flexural rigidity and resistance to loss of stability. At the same time, in the composite structures of this kind the skin isn't unidirectional, which significantly reduces the effective characteristics of the composite material.

In mesh structures, the main bearing elements are ribs, which simultaneously provide membrane and bending stiffness of the structure and are made of unidirectional carbon fiber with high specific stiffness and strength [2].

In the construction of spacecraft, where there is a need to use central tube height in the entire satellite, the mass of the structure of the power structure of the body can be significantly reduced as a result of using APT.

The mesh design is integral, which means that the connection of the ribs and the ribs with other elements of the construction is realized in the process of polymerization of the bonding composite material and no additional fasteners required.

At present, for the ribs of mesh structures, manufactured in industrial conditions of high modulus carbon plastics ( $E_1 = 220$  GPa), the modulus of elasticity is 185 GPa, i. e. approaches the module of steel with a 5.2 times less density [2].



a



b



c

Constructions of central tube of modern spacecraft:

a – central tube made of the honeycomb sandwich panel of the ISO 8 satellite (Thales Alenia Space) [3]; b – monolithic satellite central tube on the basis of the SSTL GMP-T (ESA) platform [4]; c – APT of the Express-AM5 satellite (ISS JSC) [5]

The volume content of fibers in the ribs is about 1.5 times less than in a traditional composite material. Such characteristics provide exceptionally high weight efficiency of the mesh structures.

Another feature of mesh structures determines its high resistance to loss of stability. The reason of this effect is related with the initial imperfections of the shell surface shape. Mesh structures, in contrast to traditional monolithic, have self-stabilization properties, which means that during an axial compression, the spiral ribs stretch the annular ribs so that the cross section automatically assumes a circular shape, and the experimental critical load is at the calculated level.

The main advantages of the mesh structures:

- high reliability;
- free from fundamental defects compared to monolithic structures;
- self-stabilization properties;
- fully integrated.

Taking into account the advantages of mesh structures, it can be concluded that their use leads to positive results in solving such tasks as reducing the mass of spacecraft and ensuring dimensional stability, strength and rigidity during operation.

## References

1. Chebotarev V. E. *Proektirovanie kosmicheskikh apparatov sistem informatsionnogo obespecheniya* [Designing spacecraft systems of information security]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2005. 488p.
2. Vasil'ev V. V., Barynin V. A., Razin A. F., Petrovskiy S. A., Khalimanovich V. I. [Anizogridnye composite mesh design – development and application of space technology] // *Kompozity i nanostruktury*. 2009. № 3. P. 38–50 (In Russ.).
3. Thales Alenia Space, site de Cannes. *Intégration de satellites* [Electronic resource]. URL: <http://www.ultraproprete.com/exemples-installations/thales-alenia-space.html/> (access: 05.08.2019).
4. Space Blog. 2015: Another year of imagination, innovation and disruption! [Electronic resource]. URL: <https://www.sstl.co.uk/Blog/January-2015/2015-Another-year-of-imagination-innovation-and/> (access: 10.08.2019).
5. Proton launches Ekspress-AM5 communications satellite [Electronic resource]. URL: [http://www.russianspaceweb.com/proton\\_ekspress\\_am5.html/](http://www.russianspaceweb.com/proton_ekspress_am5.html/) (access: 10.08.2019).

© Исева О. А., 2019



УДК 338.246

## PROSPECTS OF APPLICATION STRUCTURES MANUFACTURED BY 3D PRINTING OF METAL ALLOYS IN THE FRAMEWORK OF THE SPACE TELESCOPE “MILLIMETRON”

A. D. Leonenkov, Yu. A. Oberemok, K. N. Vinogradov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Adleon@iss-reshetnev.ru

*Relevance and prospects of using 3D printing with metal alloys in the manufacture of structures for spacecraft are presented.*

*Keywords: additive technologies, 3D printing, space telescope.*

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ В РАМКАХ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН»

А. Д. Леоненков, Ю. А. Оберемок, К. Н. Виноградов

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

*Раскрыта актуальность и представлены перспективы применения 3D-печати металлическими сплавами при изготовлении конструкций для космических аппаратов.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, космический телескоп.*

When designing the power structures of the spacecraft, the most important factors determining the design are weight, strength and rigidity. In this case, the main task of the designer is to reduce the weight while maintaining the required parameters of strength and rigidity [1]. Especially this issue is relevant for geostationary satellites and spacecraft intended for the investigation of deep space, since the cost of launching payloads to corresponding orbits ranges from 8.5 to 35 thousand dollars per kilogram, depending on the launch vehicle and the mass of launch payload.

Consider the design of the mirror system of the “Millimetron” space telescope presented in fig. 1 and consisting of the following main parts: the main mirror,

the central mirror, the counter reflector and the rotary mirror [2]. The main mirror is based on 24 transformable petals, each of which, in turn, is a power frame (fig. 2), consisting of a set of carbon fiber tubes and titanium fittings (fig. 3) with three reflective panels mounted on it.

When developing the frame, several design options were considered, it was assumed that traditional methods of machining were used in the manufacture of titanium fittings, the best option satisfying the strength requirements had a mass of about 6 kg, which in total gave a weight of 144 kg for all main mirror frames, as a result the mass budget has been exceeded and the need has arisen for a radically new solution.

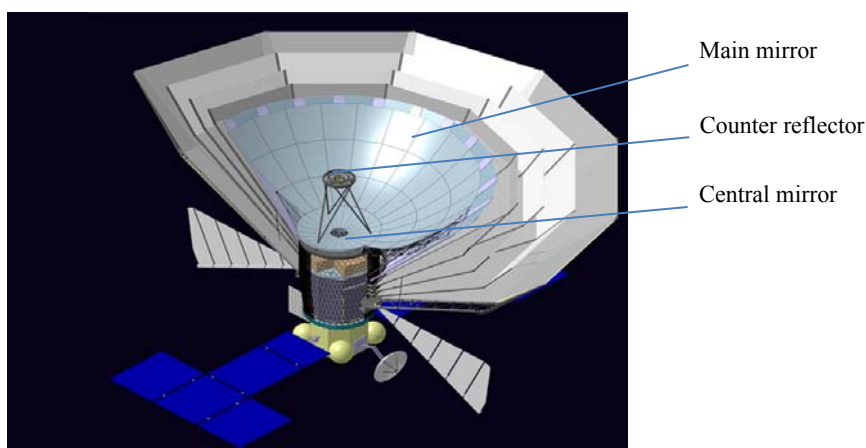


Figure 1

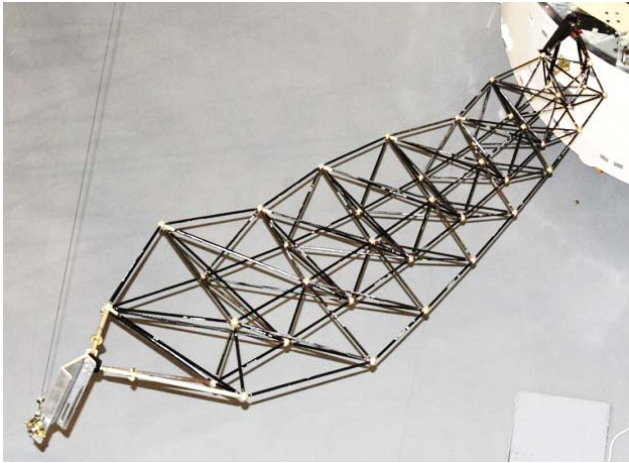


Figure 2

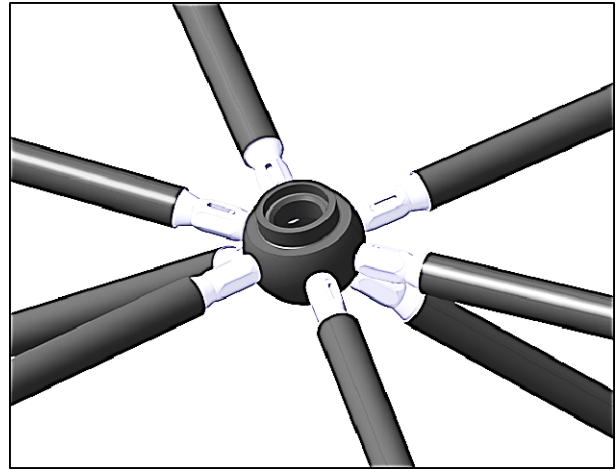


Figure 3

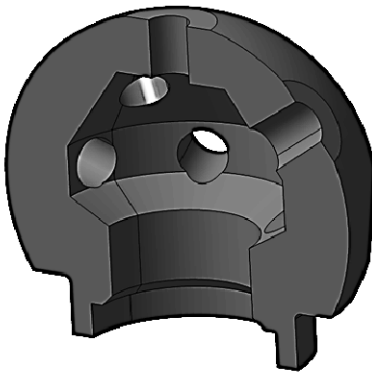


Figure 4

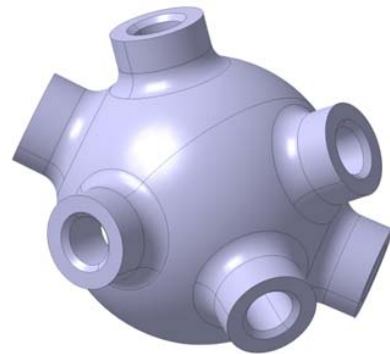


Figure 5

Half of the mass in the frame falls on titanium fittings, the rest is on carbon-fiber tubes and fasteners, and weight reduction in this part is not possible without degrading the structural properties. When using traditional metalworking technologies, the weight of one fitting (fig. 4) averaged about 60 grams, which for a total of 1056 pieces was 63.3 kg.

To facilitate these elements, fittings made using additive technologies – 3D printing with metal powders – were designed. Powder of titanium alloy VT6 was chosen as the material for printing based on the operating conditions; EBM technology and equipment from “Arcam” were used for printing [3].

3D printing allowed to perform profiled walls of fittings (fig. 5) and significantly reduce their weight, the tensile strength obtained from the results of tests of printed samples exceeded the value of  $\approx 1000$  MPa, whereas the standard value for the alloy of  $\approx 880$  MPa [4; 5]. The total mass of the fitting shown in fig. 5 made by 3D printing was 16 grams, which made it possible to lighten the design of the main mirror by 46.5 kg and meet the mass budget.

Conclusions: Given the unique design and the lack of mass production, the use of additive technologies in the

development of the main mirror of the “Millimetron” space telescope is a reasonable step that will significantly reduce the weight and reduce the cost of manufacture of individual parts of the structure.

#### References

1. Low-cost 3D printing for science, education, sustainable development / E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro // ICTP. 2013. 184 p.
2. Additive technologies in machine building / M. A. Zlenko, A. A. Popovich, I. N. Mutylyina. Sankt-Peterburg, SPbGU, 2013. 221 p.
3. Valetov V. A. [Additive technologies (condition and perspectives)]. Additivnyye tekhnologii (sostoyaniye i perspektivy). [Universitet ITMO Textbook] SPb., 2015. 63 p.
4. Description of the construction of the space telescope “Millimetron” [Electronic resource]. URL: Asclebedev.ru (access: 10.08.2019).
5. EBM Technology Description [Electronic resource]. URL: 3Dtoday.ru (access: 10.08.2019).

© Leonenkov A. D., Oberemok Yu. A., Vinogradov K. N., 2019

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНЕЙНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ\*

А. В. Азин<sup>1</sup>, С. А. Кузнецов<sup>2</sup>, С. В. Пономарев<sup>1</sup>, С. В. Рикконен<sup>1</sup>

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

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

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*Замена всех электромеханических приводов на менее массогабаритные пьезопроводы является актуальной задачей космической отрасли. Представлено математическое и физическое моделирование линейных пьезодвигателей для натяжителей вант регулируемого рефлектора КА.*

*Ключевые слова: пьезоэлектрический двигатель, космический аппарат, колебательная система, математическая модель, пьезопакет.*

## SIMULATION OF LINEAR PIEZOELECTRIC MOTOR OPERATING MODES

A. V. Azin<sup>1</sup>, S. A. Kuznetsov<sup>2</sup>, S. V. Ponomarev<sup>1</sup>, S. V. Rikkonen<sup>1</sup>

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

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

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*Reducing the mass of the spacecraft is an urgent task for the space industry. Piezoelectric motors have a smaller mass and dimensions compared to electromagnetic motors. It is proposed to use piezoelectric motors to implement a system of autonomous adjustment of the reflecting surface of a large-sized transformable reflector. The article presents the results of the development of a mathematical model of a linear piezoelectric motor. The model takes into account the features of the PZT-Stack and allows you to calculate the operating modes of the piezoelectric motor in terms of load, frequency and amplitude of the supply voltage.*

*Keywords: piezoelectric motor, spacecraft, oscillatory system, mathematical model, PZT-Stack.*

Пьезоэлектрический двигатель на основе многослойного пьезопакета обладает рядом преимуществ над остальными типами двигателей для применения в условиях космоса: точность позиционирования, стабильность работы при динамическом режиме, развиваемое усилие, температурный диапазон работы, малый вес и габариты.

В работе представлена математическая модель работы линейного пьезодвигателя (ПД) типа «Захват» [1]. Математическая модель позволяет рассчитать рабочие режимы работы линейного пьезодвигателя.

Непосредственно преобразование электрической энергии в механическую энергию происходит в пьезопакете ПД. Все остальные элементы колебательной

системы ПД передают механическую энергию в нагрузку.

Особенности работы данных двигателей заключаются в нелинейном поведении пьезопакета ПД в зависимости от величины перемещения пьезопакета.

Вторым фактором является выбор формы питающего напряжения. Для пошагового режима работы ПД наиболее эффективным является пилообразная форма питающего напряжения [2; 3].

Разработанная математическая модель позволяет рассчитать режимы работы шагового линейного ПД и определить зоны устойчивой работы всей системы ПД.

В работе представлен расчет и эксперимент исследования пьезодвигателя в пошаговом режиме перемещения штока [4].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0257.

Экспериментальные работы проводились на ПД, выполненных на основе пьезопакетов АПМ 2-22 и АПМ 2-11, отечественного производства.

#### Библиографические ссылки

1. Alignment of distributed oscillation systems in piezo motors / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev et al. // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1145, № 012007.

2. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов н/Д : Изд-во Южного федерального университета, 2008. 159 с.

3. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров и др. СПб. : Изд-во СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.

4. Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2103, № 020001.

#### References

1. Alignment of distributed oscillation systems in piezo motors / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev et al. // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1145, № 012007.

2. Panich A. E. *P'ezokeramicheskie aktyuatory* [Piezoceramic actuators]. Rostov n/D : Southern federal university Publ., 2008. 159 p.

3. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy* [Actuators and systems for micromotion] / A. A. Bobtsov, V. I. Boykov, S. V. Bystrov et al. St.Petersburg, ITMO University Publ., 2011. 131 p.

4. Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system / A. Azin, S. Rikkonen, S. Ponomarev et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2103, № 020001.

© Азин А. В., Кузнецов С. А.,  
Пономарев С. В., Рикконен С. В., 2019

УДК 624.139.64

## ЗАГЛУБЛЕННЫЕ СЕЗОННЫЕ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРЫ ГРУНТА

В. В. Ананьев<sup>1</sup>, В. В. Голованова<sup>2</sup>, В. А. Ермолаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО НПП «Медгаз»

Российская Федерация, 121471, г. Москва, Можайское шоссе, 29

E-mail: vvanord@yandex.ru

<sup>2</sup>АО «КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе»

Российская Федерация, 195009, г. Санкт-Петербург, улица Комсомола, 1-3, лит. м

E-mail: vasilin-a@rambler.ru

<sup>3</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

Российская Федерация, 650000 г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

*Предложено конструктивное решение заглубленного сезонного термостабилизатора грунта с конденсатором, вмещенным в слой сезонного замораживания и оттаивания. Выбраны озонобезопасные хладагенты для заправки таких сезонных охлаждающих устройств.*

*Ключевые слова: термостабилизация грунтов, сезонный термостабилизатор, мерзлые грунты.*

## DEEP SEASONAL SOIL THERMOSTABILIZERS

V. V. Ananiev<sup>1</sup>, V. V. Golovanova<sup>2</sup>, V. A. Ermolaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LLC SPE “Medgas”

29, Mozhaiskoye shosse, Moscow, 121471, Russian Federation

E-mail: vvanord@yandex.ru

<sup>2</sup>The Arsenal Design Bureau named after M. V. Frunze

1-3, lit. m, Komsomol Str., St. Petersburg, 195009, Russian Federation

E-mail: vasilin-a@rambler.ru

<sup>3</sup>Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev

28, Vesennyay Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation

E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

*A constructive solution for the deep seasonal ground thermostabilizer with a capacitor, inimated in a layer of seasonal freezing and thawing, has been proposed. Ozone-safe coolant has been selected to refuel such seasonal cooling devices.*

*Keywords: thermostabilization of the ground, the season thermostabilizer, frozen soils.*

При строительстве объектов газоконденсатных и нефтяных месторождений в районах Крайнего Севера в настоящее время применяют для сохранения мерзлого состояния и обеспечения несущей способности грунтов оснований по принципу 1 сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ), или сезонные термостабилизаторы грунта (ЗСТГ), и рекомендуется [1; 2], как правило, в сочетании с другими охлаждающими устройствами.

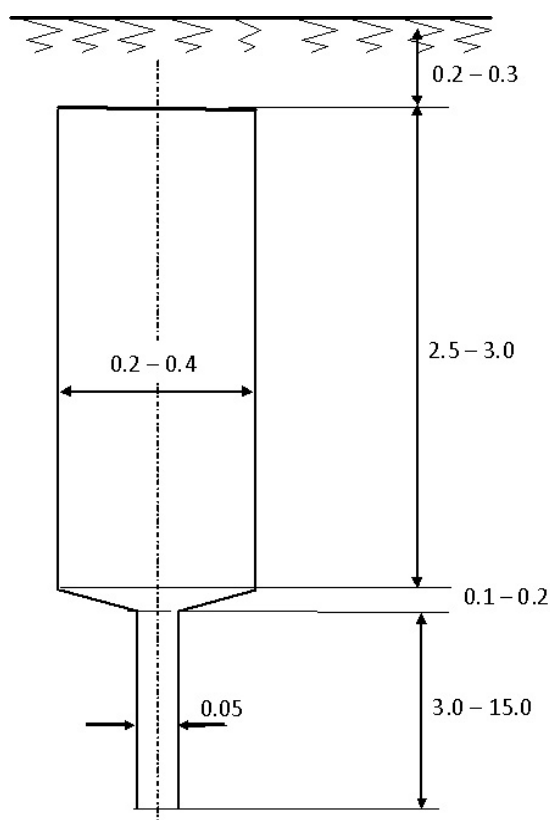
Анализ литературных источников [1; 2] и результаты расчетов в работе [3] (глава 7, стр. 122–126) показывают, что в зимнее время температура в верхних слоях грунта лежит в пределах от – 10 до – 15 °С и ниже.

Поэтому возникает возможность разработки СОУ с конденсатором, расположенным в массиве грунта ниже дневной поверхности. В пользу такого решения следующие соображения: 1. При температуре воздуха – 20 °С на глубине 1,0–2,0 м средняя температура грунта около – 10 °С; 2. СОУ с заглубленным конденсатором, то есть полностью заглубленное сезонно замораживающее устройство – ЗСТГ, позволяет ре-

шать задачи термостабилизации мерзлых грунтов преимущественно на больших площадях. Например, аэродромы, вертодромы, взлётно-посадочные полосы, автодороги, верхнее строение и насыпи железных дорог и т. п.

Применение заглубленных термостабилизаторов, передающих тепловую энергию из грунта в приповерхностные слои грунта сезонного замораживания-оттаивания, например, к полотну дороги [4] – весьма эффективный способ борьбы с наледью. Тепловая мощность достаточна для возникновения сублимации, которая ослабит связь между поверхностью сооружения и льдом.

Конструкция такого устройства (рис. 1) состоит из двух труб: испарителя с диаметром 0,05–0,06 м и конденсатора с диаметром 0,2–0,4 м. Установка ЗСТГ производится проходкой скважины под тонкую трубу с последующим проходкой верхней части под трубу с диаметром 0,2–0,4 м ЗСТГ передает холод от верхних слоев к нижним [3], чтобы замороженный слой надежно термостабилизировал мерзлый грунт на весь теплый период года.



Заглубленный сезонный термостабилизатор грунта

Для отработки методики предложена установка, состоящая из камеры, моделирующей верхний слой грунта с вмещенным в него конденсатором, и трубы испарителя в грунте. Камера заполнена песком, который охлаждается до температуры  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , например, рассольным способом с помощью холодильной машины. Предусмотрена заправка ЗСТГ хладагентами-теплоносителями R404A, R410A и R744. Схема измерений предусматривает измерение температуры песка в камере на границе с трубой ЗСОУ и температуры в окружающем грунте на разной глубине в контрольных скважинах, расположенных на разных расстояниях вокруг ЗСТГ. Кроме того измеряются давление и температура в конденсаторе и в испарителе. На основе теории, разработанной в [3], предложены конструктивное решение сезонного охлаждающего устройства с заглубленным конденсатором ЗСТГ, вмещенном в слой сезонного замораживания и оттаивания грунта с целью решения задач проектирования термостабилизации мерзлых грунтов, преимущественно на больших площадях, где невозможно расположить надземные трубы с конденсаторами, т. е. аэродромы, вертодромы, взлётно-посадочные полосы, автодороги, верхнее строение и насыпи железных дорог и т. п.

Дано схемное решение опытной экспериментальной установки отработки методик расчета, испытаний и проверки теоретических положений метода элементарных объемов.

Выбраны озонобезопасные хладоны для заправки сезонных охлаждающих устройств с заглубленным конденсатором ЗСТГ.

#### Библиографические ссылки

1. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах – Госстрой СССР. М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1980. 56 с.
2. Теплофизические свойства горных пород. М. : МГУ, 1984. 485 с.
3. Улитин В. В. Метод элементарных объемов при решении нелинейных задач теплопроводности и геокриологии : монография. СПб. : Парк Ком, 2013. 170 с.
4. Гамзаев Р. Г. Термостабилизация грунта в дорожном строительстве // Дороги. Инновации в строительстве. 2018. С. 91–93.

#### References

1. Snip 2.02.04–88 bases and foundations on site soil-Gosstroy of USSR-m. Moscow : CИTP Gosstroy of USSR, 1980.0-56 p. (In Russ.).
2. Thermal properties of rocks. Moscow : MSU. 1984. 485 p. (In Russ.).
3. Ulytin V. V. Elementary volumes in solving non-linear problems of thermal conductivity and geocryology : monograph. St. Petersburg : Park Com, 2013. 170 p. (In Russ)
4. Gamzaev R. G. Thermostabilization of the ground in road construction/Roads. Innovations in construction. 2018. P. 91–93 (In Russ.).

© Ананьев В. В., Голованова В. В., Ермолаев В. А., 2019

УДК 621.396.67

## МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

С. С. Бацаев\*, В. В. Лайзан, Н. Г. Цытыркин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: alexgoldrey@gmail.com

*При изготовлении космического аппарата необходима плотная компоновка и точность в установке узлов и оборудования. Одной из целей при изготовлении сотовых панелей является получение плоскостности поверхностей. Представлена методика изготовления сотовых панелей с использованием подкладных листов из стеклотекстолита.*

*Ключевые слова: панель, плоскостность, полимерные композиционные материалы, стеклотекстолит.*

## METHOD OF MANUFACTURING HONEYCOMB PANELS FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

S. S. Batsaev\*, V. V. Laizan, N. G. Tsytyrkin

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: alexgoldrey@gmail.com

*At manufacture of the starcraft requires a tight layout and accuracy in the installation of components and equipment. One of the goals in the manufacture of honeycomb panels is to obtain flatness of surfaces. The article presents a method of manufacturing honeycomb panels using lining sheets of fiberglass.*

*Keywords: panel, flatness, polymer composite materials, fiberglass.*

Сотовые панели являются основой для установки полезной нагрузки космических аппаратов. При изготовлении космического аппарата одной из важных целей является точная и эргономичная установка полезной нагрузки, а также снижение массы без потери несущей способности.

Трехслойная панель состоит из двух тонких обшивок и помещенного между ними заполнителя. Заполнитель соединяется с обшивками путем склейки, сварки, пайки [1; 2]. В настоящее время более распространенным способом соединения является склеивание.

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» активно развивается в сфере изготовления сотовых конструкций. Для обеспечения точности исследуются новые материалы как для изготовления обшивок, так и для склеивания сборочной единицы.

В ходе изготовления сотовых панелей производство столкнулось с недостаточной точностью сотовой панели. Было выявлено, что плоскостность панели оказывает влияние на расположение отверстий в закладных элементах.

В ходе решения были поставлены задачи, одной из которых являлось изменение материала подкладных листов для склеивания сотовой панели.

Подкладной лист используется для равномерного распределения давления по поверхности сотовой панели.

Ранее при склеивании панели использовались подкладные листы из алюминия [3]. Одним из плюсов алюминия была возможность многократного использования, но при склеивании панели из углепластиковых обшивок [4; 5] их коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) разнился в несколько раз.

В ходе конструкторско-технологических работ, было принято решение изменения материала подкладных листов на стеклотекстолит. КЛТР данного материала меньше КЛТР алюминия в 3 раза.

Измерение на контрольно-измерительной машине показало улучшение характеристик сотовых панелей при использовании подкладных листов из стеклотекстолита марки КАСТ-В.

Позже было принято решение о повышении требований к точности поверхности подкладных листов. Были заложены дополнительные требования к поверхности заготовок. Опытным путем определили, что плоскостность поверхности подкладных листов должна быть как минимум точнее поверхности изготавливаемых сотовых панелей. Плоскость поверхности подкладного листа измеряется на контрольно-измерительной машине либо линейалом и щупом.

По полученным результатам измерений можно сделать вывод о том, что использование стеклотекстолита дает новые возможности по получению более точных характеристик сотовых панелей, учитывая что плоскость поверхности влияет на расположение от-

верстий, а следовательно и на точность установки полезной нагрузки.

#### Библиографические ссылки

1. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / А. И. Ендогур, М. В. Вайнберг, К. М. Иерусалимский. М. : Машиностроение, 1986. 200 с.
2. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения : учеб. пособие. Кн. 1. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005.
3. Пат. 2547735 Российской Федерации, МПК В32В 37/10. Способ изготовления крупногабаритных трехслойных панелей / Ишенина Н. Н., Злотенко В. В., Михнев М. М. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнева. № 2013122486 ; заявл. 15.05.2013 ; опубл. 10.04.2015.
4. Ивановская О. В., Шевцова М. А. Производство изделий из полимерных композиционных материалов : учеб. пособие. Харьков : ХАИ, 2005. 84 с.
5. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.

#### References

1. Endogur A. I., Vainberg M. V., Ierusalimskii K. M., Sotovyе konstruksii. Vybor parametrov i proektirovanie. [Honeycomb constructions. Parameter selection and design.]. Moscow : Nauka Publ., 1986.
2. Chebotarev V. E. Design of spacecraft information systems: proc. Handbook: book. 1. The internal design of the spacecraft DL / Sib. Gos. Aerospace. Un-t. Krasnoyarsk, 2005.
3. Ishenina N. N., Zlotenko V. V., Mikhnev M. M., Sposob izgotovleniya krupnogabaritnykh trekhsloinykh panelei. [Method of manufacturing a large three-layer panels.]. Patent RF, № 2547735, 2015.
4. Ivanovskaja O. V., Shevcova M. A. Proizvodstvo izdelij iz polimernyh kompozicionnyh Uchebnoe posobie po laboratornomu praktikumu materialov [Production of products from polymeric composite materials The manual on a laboratory practical work]. Har'kov : HAI, 2005. 84 p.
5. Bataev A. A., Bataev V. A. Kompozitsionnye Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie. [Composite materials: structure, production, application]. Novosibirsk : publisher NGTU, 2002. 384 p.

© Бацаев С. С., Лайзан В. В.,  
Цытыркин Н. Г., 2019



УДК 539.3

## РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С КРУПНОГАБАРИТНЫМИ ТРАНСФОРМИРУЕМЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ

А. В. Бельков<sup>1</sup>, С. В. Белов<sup>1</sup>, А. П. Жуков<sup>1</sup>, С. В. Пономарев<sup>1</sup>, Д. О. Шендалев<sup>2</sup>

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

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

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: zh@niipmm.tsu.ru

*Рассматриваются основные этапы и методы, используемые при проектных расчетах космических аппаратов с крупногабаритными трансформируемыми рефлекторами.*

*Ключевые слова: метод плотности сил, метод конечных элементов, рефлектор, динамика космического аппарата.*

## NUMERICAL METHODS FOR SPACECRAFT LARGE-SIZED DEPLOYABLE REFLECTORS

A. V. Belkov<sup>1</sup>, S. V. Belov<sup>1</sup>, A. P. Zhukov<sup>1</sup>, S. V. Ponomarev<sup>1</sup>, D. O. Shendalev<sup>2</sup>

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

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

E-mail: zh@niipmm.tsu.ru

*Essential stages and calculation methods for spacecraft with large-sized deployable reflectors are considered.*

*Keywords: force density method, finite element method, reflector, spacecraft dynamics.*

Радиотехнические характеристики крупногабаритной рефлекторной антенны во многом определяются точностью, с которой ее отражающая поверхность соответствует оптимальной (параболической) форме. Так как антенна является конструктивной частью космического аппарата, то ее отражающая поверхность подвержена возмущениям, которые обусловлены функционированием космического аппарата.

В данной работе рассматриваются рефлекторы с отражающей поверхностью, сформированной из металлизированного трикотажного материала – сетеполотна. Сетеполотно закреплено на системе взаимно пересекающихся шнуров (фронтальная сеть), фронтальная сеть закреплена на стержневом силовом каркасе. Форма сетеполотна задается системой дополнительных шнуров и оттяжек (тыльная сеть), связывающих фронтальную сеть с силовым каркасом.

При численном анализе конструкции космического аппарата рассматривались следующие вопросы:

- структура равнотянутой фронтальной сети (все шнуры имеют равное натяжение);
- сетеполотно на фронтальной сети;
- конструкция рефлектора как отдельная механическая система;
- космический аппарат с интегрированным в его конструкцию рефлектором.

Равнотянутая фронтальная сеть обеспечивает заданное натяжение сетеполотна по всей площади отражающей поверхности. Это, в свою очередь, позволяет получить необходимую электропроводность материала сетеполотна, которая непосредственно определяет его радиоотражающие характеристики.

Структура равнотянутой фронтальной сети совместно с тыльной сетью, задающей форму фронтальной сети, определяется численно, с использованием метода плотности сил. Следует отметить, что разработчики определяют структуры фронтальной и тыльной сетей исходя во многом из интуитивных соображений. При этом равнотянутость фронтальной сети остается под вопросом.

При использовании метода плотности сил:

- исходные структуры фронтальной и тыльной сетей рассматриваются как исходные данные;
- определяется структура равнотянутой фронтальной сети, которая может значительно отличаться от исходной;
- определяются натяжения в шнурах тыльной сети, обеспечивающие требуемую форму фронтальной сети;
- определяется натяжение и длина каждого шнура фронтальной и тыльной сетей.

Результаты расчетов показывают, что применение метода плотности сил позволяет определить структуру

ру фронтальной сети, имеющей высокую степень однородности натяжения. При номинальном натяжении 10 Н среднеквадратичное отклонение составило  $10^{-5}$  Н. После интегрирования фронтальной и тыльной сетей с сетеполотном и силовым каркасом в конечно-элементную модель величина среднеквадратичного отклонения увеличилась за счет влияния натяжения сетеполотна и деформаций силового каркаса. Так, для зонтичного рефлектора это отклонение составило 0,94 Н, а для ободного – 1,03 Н (оба рефлектора имели диаметр 10 м).

Для определения напряженно-деформированного состояния рефлектора с минимальным среднеквадратичным отклонением отражающей поверхности от оптимального положения используется методы последовательного отпускания конструкции или динамической релаксации и фиктивного термического нагружения. Равнотянутая сеть в составе конечно-элементной модели рефлектора позволила значительно упростить процедуру.

Конечно-элементная модель рефлектора интегрировалась в конечно-элементную модель космического аппарата, которая включала корпус, панели солнечных батарей и штангу, связывающую корпус с рефлектором. Полная модель космического аппарата использовалась для определения теплового и термомеханического состояния рефлектора, а также для анализа динамической реакции конструкции космического аппарата на действие нестационарных возмущающих моментов сил, приложенных к его корпусу.

Тепловое состояние рефлектора на геостационарной орбите определялось с учетом взаимозатенения

элементов конструкции и затенения частями космического аппарата. Для тонкостенных сетчатых структур определялись эффективные термомеханические характеристики, позволяющие адекватно описывать их тепловое поведение. Для термомеханического анализа рефлектора разработан численный алгоритм переноса температурных полей с тепловой конечно-элементной модели на механическую конечно-элементную модель с использованием различных типов элементов.

В расчетах определялось нестационарное отклонение отражающей поверхности рефлектора от идеального параболоида, построенного в системе координат, связанной с корпусом космического аппарата. Результаты показывают, что под действием возмущений свободно движущийся космический аппарат совершает колебания подобно системе с двумя неточечными массами, соединенными гибкой балкой. Отклонения рефлектора от оптимального положения в основном связаны с перемещениями и поворотами рефлектора относительно корпуса космического аппарата. После окончания действия возмущения рефлектор продолжает совершать колебания (остаточные колебания) относительно своего оптимального положения. При этом амплитуда колебаний рефлектора определяется интенсивностью и продолжительностью действия возмущения. Результаты показывают, что при определенных параметрах возмущения можно получить значительное ослабление амплитуды остаточных колебаний.

© Бельков А. В., Белов С. В., Жуков А. П.,  
Пономарев С. В., Шендалев Д. О., 2019

УДК 629.7.018.4:534.1

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. А. Бернс<sup>1,2</sup>, Д. А. Красноруцкий<sup>1,2\*</sup>, П. А. Лакиза<sup>1,2</sup>, Д. А. Маринин<sup>3</sup>, Е. П. Жуков<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

<sup>3</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: krasnorutskiy@corp.nstu.ru

*Предлагается метод модального анализа крупногабаритных трансформируемых конструкций, суть которого заключается в том, что валидация математической модели целой конструкции заменяется валидацией математических моделей её составных частей.*

*Ключевые слова: модальный анализ, коррекция математической модели, конечно-элементная модель, валидация.*

## NUMERICAL-EXPERIMENTAL METHOD OF MODAL ANALYSIS OF LARGE-SIZED TRANSFORMABLE STRUCTURES

V. A. Berns<sup>1,2</sup>, D. A. Krasnorutskiy<sup>1,2\*</sup>, P. A. Lakiza<sup>1,2</sup>, D. A. Marinin<sup>3</sup>, E. P. Zhukov<sup>1,2</sup>

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

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

20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, 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: krasnorutskiy@corp.nstu.ru

*The method of modal analysis of large-sized transformable structures is proposed, a validation of the mathematical model of the whole structure is replaced by the validation of mathematical models of its parts.*

*Keywords: modal analysis, model updating, finite element model, validation.*

**Введение.** Испытания крупногабаритных трансформируемых конструкций сопряжены с определенными трудностями. Суть предлагаемого в данной работе расчетно-экспериментального метода модального анализа состоит в том, что валидация модели всего аппарата происходит по результатам испытаний его составных частей, а не всей конструкции в сборе, что существенно упрощает проведение экспериментов. Во-первых, для проведения испытаний по частям требуется меньше площади, чем для испытаний всей конструкции. Во-вторых, частоты собственных колебаний каждой из составных частей выше частот целой конструкции, что, в определенном смысле, снижает требования к испытательной аппаратуре, уменьшает влияние воздушной среды на результаты испытаний.

**Метод.** В рамках предлагаемого расчетно-экспериментального метода предполагается создание конечно-элементной (КЭ) модели всей крупногабаритной трансформируемой конструкции из КЭ-моделей составных частей, для которых проводится валидация. Метод конечных элементов широко применяется для анализа динамического поведения раз-

личных конструкций, но на практике получаемые модели не всегда достаточно точно описывают требуемые динамические параметры, которые получают при проведении натурального эксперимента. Поэтому проводят коррекцию модели путем внесения изменений в исходные данные, либо введением дополнительных неизвестных в матрицы жесткости и/или масс с последующим решением задачи минимизации отклонения параметров скорректированной модели от экспериментальных данных [1–4]. Такими параметрами, как правило, являются частоты и формы собственных колебаний конструкций.

Процедура валидации математических моделей составных частей основана на двух методах: метод коррекции закрепленной КЭ-модели и метод освобождения КЭ-модели от закреплений [5].

**1. Метод коррекции.** В основе метода лежит виртуальное масштабирование каждой степени свободы со своим коэффициентом. Это позволяет учесть влияние изменения масштаба каждой степени свободы на все уравнения движения и сохранить симметрию матрицы жесткости.

Пусть задана система уравнений собственных колебаний конечно-элементной модели (КЭ-модель) конструкции в следующем виде:

$$KX + M\ddot{X} = 0. \quad (1)$$

где  $K$  – матрица жесткости;  $M$  – матрица масс конструкции;  $X$  – вектор перемещений.

Для коррекции динамических свойств КЭ-модели будем вносить изменения только в матрицу жесткости следующим образом:

$$\tilde{K} = \begin{pmatrix} k_{11}(1+c_1) & k_{12}(1+c_1)(1+c_2) & \dots & k_{1n}(1+c_1)(1+c_n), \\ k_{21}(1+c_2)(1+c_1) & k_{22}(1+c_2) & \dots & k_{2n}(1+c_2)(1+c_n), \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1}(1+c_n)(1+c_1) & k_{n2}(1+c_n)(1+c_2) & \dots & k_{nn}(1+c_n), \end{pmatrix} \quad (2)$$

где  $c_i, i = 1, 2, \dots, n$  – коэффициенты коррекции;  $n$  – число степеней свободы расчетной модели.

Целью коррекции КЭ-модели является изменение динамических свойств модели таким образом, чтобы  $s$  заданных частот собственных колебаний скорректированной модели были близки с заданной степенью точности к целевым значениям этих частот, найденным экспериментально.

Пусть в результате решения обобщенной проблемы (1) имеется  $s \ll n$  тонов собственных колебаний, представленных собственными частотами  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$  и формами колебаний  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_s$ . Первая итерация предлагаемого метода заключается в том, чтобы найти такие коэффициенты  $c_i$ , которые будут решением следующей недоопределенной системы нелинейных уравнений

$$f_i = \Phi_i^T \tilde{K} \Phi_i - \omega_i^2 \Phi_i^T M \Phi_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, s, \quad (3)$$

где  $\omega_i$  – целевые значения частот собственных колебаний, определенные из эксперимента.

Решение недоопределенной системы (3) находим как минимум суммы квадратов уравнений. Затем находим решение обобщенной проблемы (1) с новой матрицей жесткости. Проверяем условие близости собственных частот, повторяем итерацию (3) с новыми формами. При этом новая матрица жесткости строится из (2) на основе исходной матрицы с помощью коэффициентов  $c_i$ , найденных на предыдущей итерации.

**2. Метод освобождения.** После проведения испытаний закрепленной конструкции, проводится коррекция КЭ-модели по описанному выше алгоритму, а затем модель виртуально освобождается от закреплений [5]. Такой подход исключает сложную процедуру вывешивания для имитации свободных колебаний. Суть метода освобождения заключается в том, что матрица жесткости  $K$  и масс  $M$  дополняются новыми строками и столбцами, которые описывают движения конструкции как жесткого целого. Дополненная система уравнений колебаний имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} K & -(\Sigma k)^T \\ -\Sigma k & (\kappa + \Sigma \Sigma k) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{X} \\ \xi \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & (\mu - \Sigma \Sigma m) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\tilde{X}} \\ \ddot{\xi} \end{Bmatrix} = 0, \quad (5)$$

где  $X$  – вектор перемещений;  $\xi$  – вектор, состоящий из трех перемещений и трех поворотов центра тяжести;

$\Sigma k$  – прямоугольная матрица  $6 \times N$ , где  $N$  – размер матриц  $K$  и  $M$ ,  $\kappa + \Sigma \Sigma k$  и  $\mu - \Sigma \Sigma m$  – матрицы  $6 \times 6$ , подробные выкладки и формулы для расчета этих матриц приведены в [5].

После проведения валидации каждой КЭ-модели составных частей производится синтез всех моделей по принципу ассемблирования матрицы жесткости в методе конечных элементов. Предлагаемый метод протестирован на имитационной модели каркаса зонтичной антенны.

### Библиографические ссылки

1. Кузнецов О. А., Смыслов В. И. Опыт корректирования расчетной динамической схемы по результатам резонансных испытаний // Ученые записки ЦАГИ. 1979. Т. 10, № 6. С. 99–112.
2. Baruch M. Optimization procedure to correct stiffness and flexibility matrices using vibration tests // AIAA Journal. 1978. Vol. 16, № 11. P. 1208–1210.
3. Masoud Sanayei, Peeyush Rohela, Automated finite element model updating of full-scale structures with PARAmeter Identification System (PARIS), Advances in Engineering Software. 2014. Vol. 67. P. 99–110.
4. Wang T., He H., Yan W., Chen G. P. A model-updating approach based on the component mode synthesis method and perturbation analysis // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 433. P. 349–365.
5. Метод освобождения динамической расчетной модели летательного аппарата = Method of freeing a fixed dynamic model of an aircraft / Д. А. Красноруцкий, В. А. Бернс, П. А. Лакиза, В. Е. Левин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21, № 1. С. 37–44.

### References

1. Kuznetsov O. A., Smyslov V. I. Opyt korrekcirovaniya raschetnoy dinamicheskoy skhemy po rezul'tatam rezonansnykh ispytaniy // Uchenye zapiski TsAGI. 1979. T. 10, № 6. P. 99–112.
2. Baruch M. Optimization procedure to correct stiffness and flexibility matrices using vibration tests // AIAA Journal. 1978. Vol. 16, № 11. P. 1208–1210.
3. Masoud Sanayei, Peeyush Rohela, Automated finite element model updating of full-scale structures with PARAmeter Identification System (PARIS), Advances in Engineering Software. 2014. Vol. 67. P. 99–110.
4. Wang T., He H., Yan W., Chen G. P. A model-updating approach based on the component mode synthesis method and perturbation analysis // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 433. P. 349–365.
5. Metod osvobozhdeniya dinamicheskoy raschetnoy modeli letatel'nogo apparata = Method of freeing a fixed dynamic model of an aircraft / D. A. Krasnorutskiy, V. A. Berns, P. A. Lakiza, V. E. Levin // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2019. T. 21, № 1. P. 37–44.

© Бернс В. А., Красноруцкий Д. А., Лакиза П. А., Маринин Д. А., Жуков Е. П., 2019

УДК 621.396

## МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН С ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

В. Е. Братышева, Д. В. Орлов, А. Б. Пестов

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Akimova-VikaE@mail.ru

*Предложен метод оптимизации геометрии рефлектора зеркальной антенны двойной кривизны. Рассматривается формирование косекансной диаграммы направленности в полосе частот, определяемой свойствами облучателя.*

*Ключевые слова: зеркальная антенна, косекансная диаграмма направленности, математическая модель, геометрическая оптика, дистанционное зондирование.*

## OPTIMIZATION METHOD FOR GEOMETRY OF MIRROR ANTENNAS WITH SPECIAL PATTERN

V. E. Bratysheva, D. V. Orlov, A. B. Pestov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Akimova-VikaE@mail.ru

*This paper proposes the optimization method for geometry of the double curvature reflector of mirror antenna. The forming of the cosecant pattern for given frequency range, which is determined by irradiator properties, is considered*

*Keywords: mirror antenna, cosecant pattern, mathematical model, geometrical optics, remote sensing.*

Зеркальные антенны с диаграммами направленности (ДН) специального вида широко используются при построении радиолокационных и радионавигационных комплексов, радиотехнических систем дистанционного зондирования и картографирования [1]. Для систем связи особое значение имеют зеркальные антенны со сверхнизким (до  $-60$  дБ) уровнем боковых лепестков ДН. Формирование таких ДН с помощью зеркальных антенн имеет ряд преимуществ в сравнении с фазированными антенными решетками, прежде всего вследствие компактности и простоты конструкции зеркальных антенн, состоящих из рефлектора специальной формы и облучателя. ДН специального вида в радиолокационных и радионавигационных комплексах должны обеспечивать равномерность мощности излучения в пределах заданной угловой области. В этом случае цели, характеризующиеся одинаковыми рассеивающими свойствами (например, радиолокационным сечением рассеяния), в одинаковой степени воспринимаются в границах зоны перекрытия, обеспечивая высокую эффективность обработки радиолокационной информации. Примером ДН специального вида может служить косекансная ДН, которая используется как для наземных, так и для бортовых комплексов. Для синтеза поверхности рефлектора зеркальной антенны с ДН специального вида наиболее часто используются методы геометрической оптики (ГО) [1; 2], следовательно, результаты синтеза тем точнее, чем больше размеры и радиус кривизны рефлектора по сравнению с длиной волны. Вместе

с тем, методы ГО принципиально не могут быть использованы для анализа дифракционных явлений, возникающих на краях рефлектора и существенно искажающих ДН. Кроме того, эти методы неприменимы для оптимизации поверхности рефлектора в заданном частотном диапазоне. Следовательно, методы ГО являются приближенными методами синтеза, и в основном используются для нахождения профиля сечения цилиндрического рефлектора [3]. При этом для расчета ДН в вертикальной плоскости используется апертурный метод, не учитывающий строгую картину фазовых распределений в апертуре антенны [4]. Поэтому на практике полученные результаты часто приходится корректировать, но простота и ясность физических концепций, лежащих в основе методов ГО, определила их широкое применение в инженерной практике проектирования зеркальных антенн.

Следует отметить, что рассмотренные методы являются приближенными, поэтому практическая реализация расчетного профиля рефлектора может потребовать определенной коррекции, особенно для рефлекторов относительно небольших размеров, при этом внутри допустимой области изменения размеров рефлектора существует оптимальное расстояние до облучателя. Угловой сектор  $\Psi_2$ – $\Psi_1$  обычно выбирают с учетом требования небольших уровней мощности первичного поля облучателя за пределами рефлектора (ослабление плотности потока мощности на 10 дБ) и равномерности ДН облучателя в апертуре антенны.

Изменяя в небольших пределах расчетный профиль рефлектора, можно получить приемлемый уровень искажений ДН антенны. Общим недостатком рассмотренных методов является раздельное определение функции  $\theta(\Psi)$  и уравнения профиля рефлектора [5]. При этом применяемые численные методы имеют разные уровни точности, что приводит дополнительным погрешностям синтеза ДН антенны. В приближенных методах особую важность имеют численные методы с контролем точности промежуточных вычислений для введенной математической модели антенны, когда синтез геометрии профиля рефлектора и синтез ДН антенны производится одновременно на каждом шаге последовательных приближений с заданной точностью.

#### Выводы

1. Предложенный метод синтеза профиля рефлектора двойной кривизны позволяет производить контроль точности вычислений и соответствия ДН в вертикальной плоскости на каждом шаге последовательных приближений.

2. Синтез профиля рефлектора и ДН в полосе частот требует предварительных расчетов на сетке фиксированных частот. Сегментация профиля рефлектора и компоновка его из различных участков профилей для разных частот позволяет выбрать наиболее приемлемый вариант для выбранного критерия соответствия.

3. Более точные методы синтеза должны основываться на строгих электродинамических принципах, так как они позволяют учитывать дифракционные явления, которые для рефлекторов относительно небольших размеров приводят к существенным искажениям ДН.

#### Библиографические ссылки

1. Галимов Г. К. Зеркальные антенны : в 3 т. М. : Адвансет Солюшенз, 2010. Т. 1. 204 с.
2. Кюн Р. Микроволновые антенны. М. : Судостроение, 1967. 520 с.
3. Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. М. : Советское радио, 1974. 536 с.
4. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://bourabai.ru/physics/0181.html> (дата обращения: 10.08.2019).
5. Войтович Н. И., Хашимов А. Б. О соответствии асимптотических решений двумерных и трехмерных задач в антенной технике // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 12. С. 1471–1476.

#### References

1. Galimov G. K. Mirror antennas: 3 t. Moscow : Advance Solutions Solutions, 2010. T. 1. 204 p.
2. Kuehn R. Microwave antennas. Moscow : Shipbuilding, 1967. 520 p.
3. Antenna-feeder devices / A. L. Drabkin, V. L. Zuzenko, A. G. Kislov. Moscow : Soviet Radio, 1974. 536 p.
4. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: <https://bourabai.ru/physics/0181.html> (access: 10.08.2019).
5. Voitovich N. I., Khashimov A. B. On the correspondence of asymptotic solutions of two-dimensional and three-dimensional problems in antenna technology // Radio engineering and electronics. 2010. T. 55, № 12. P. 1471–1476.

© Братышева В. Е., Орлов Д. В.,  
Пестов А. Б., 2019

УДК 629.76/78.001.63

## ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА РАСКРЫТИЯ ОБОДНОГО КОСМИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА

А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова

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

*Рассмотрены проблемы оптимизации привода развёртывания сетчатого ободного рефлектора, в котором силовой каркас состоит из складывающегося кольца, шарнирно соединённого со стойками.*

*Ключевые слова: крупногабаритный космический рефлектор, кольцевой силовой складывающийся обод, опорные стойки, пружинный привод развёртывания.*

## OPTIMIZATION OF THE DEPLOYMENT MECHANISM OF THE RIMMED SPACE REFLECTOR

A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova

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

*The article considers the problem of optimization of the actuator a mesh rim of a reflector, where the power frame consists of a folding ring pivotally connected to increased stiffness struts.*

*Keywords: large-sized space reflector, folding rim, increased stiffness struts, deploying spring gearing.*

Ободной космический рефлектор состоит из силового обода, формообразующей структуры (ФОС) из шнуров и закреплённой на этой структуре сетчатой отражающей поверхности. Ранее [1] была рассмотрена конструктивная схема ободного рефлектора, состоящего из несущих ФОС стоек и стержней обода, объединяющих стойки в кольцевую структуру. Силовым элементом механизма раскрытия в этой схеме была пружина сжатия с кривошипно-ползунным механизмом (КПМ) и оптимизированный (первый этап оптимизации) рычажно-стержневой механизм.

Анализ сил сопротивления для такого рефлектора показал, что график изменения момента сопротивления, приведённого к стержню обода от угла наклона этого стержня, имеет типичную форму, показанную на рис. 1.

В графике учтены силы от сопротивления укладки ФОС, силы трения в механизмах, момент от выключенного двигателя привода управления, сила натяжения сетеполотна и шнуров.

На графике можно выделить две зоны:

От 90 до 5° с плавно изменяющейся кривой (силы трения, начало натяжения сетеполотна).

От 5 до 0° с резко изменяющейся кривой, соответствующей натяжению шнуров.

Оптимизация механизма раскрытия ободного космического рефлектора заключается в создании привода развёртывания с силовой характеристикой подобной

характеристике сил сопротивления с минимизацией превышения движущих сил механизма развёртывания до необходимого уровня во всём цикле развёртывания.

На первом этапе оптимизации в выбранной схеме обода с одной пружиной сжатия в узловом шарнире, соединяющем стержни обода и стойки, была отработана схема рычажно-стержневого механизма, компенсирующего силы сопротивления на этапе от 5 до 0° с резко изменяющейся кривой, соответствующей натяжению шнуров ФОС.

Такая схема силового механизма привела, однако, к значительному нагружению деталей конструкции на первом этапе развёртывания (рис. 2) и потребовала дальнейшей оптимизации.

Оптимизация данной схемы до необходимого уровня (второй этап) может быть достигнута:

а) увеличением передаточного отношения по усилию от ползуна КПМ к стержню обода на участке от 5 до 3°. Достижение этой цели возможно при установке оси с эксцентриком для связи ползуна 3 и стержня 2. Ось с эксцентриком должна быть кинематически связана со стержнем обода.

б) введением дополнительных спиральных пружин в шарнирные узлы стержней обода.

В результате дополнительной оптимизации конструкции нагрузка на элементы механизма может снизиться более чем в 2 раза (рис. 3), при практически неизменной массе.

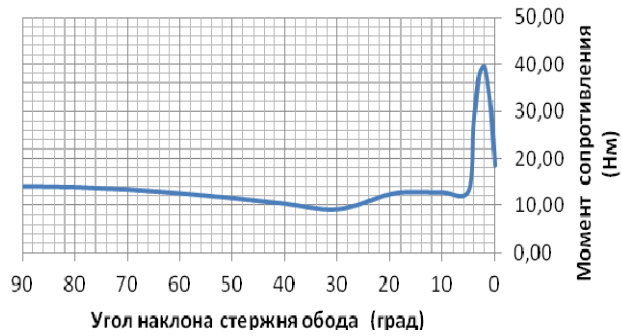


Рис. 1. График изменения момента сопротивления

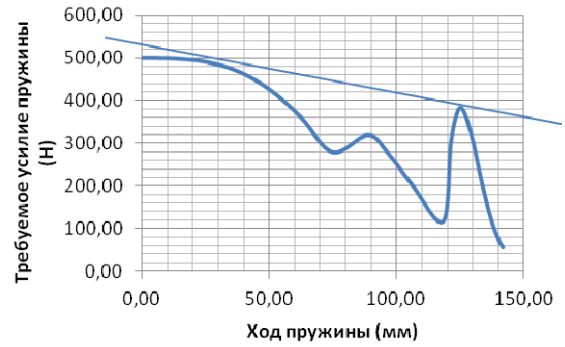


Рис. 2. Требуемое усилие в КПМ и характеристика пружины сжатия

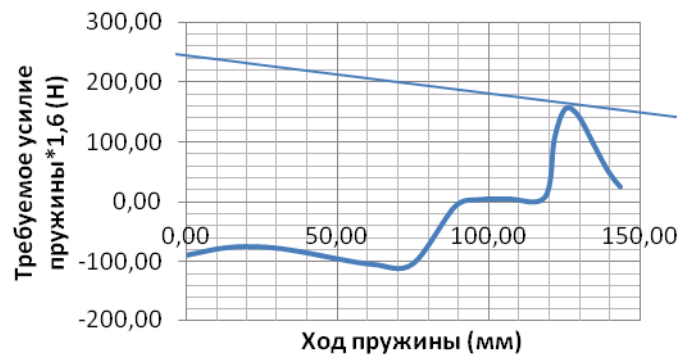


Рис. 3. Требуемое в КПМ с эксцентриковой осью и спиральными пружинами и характеристика пружины сжатия

Кроме того, при дополнительной оптимизации до 1,3 должен вырасти коэффициент запаса.

#### Библиографическая ссылка

1. Ободной крупногабаритный космический рефлектор / А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логина ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2018.

#### Reference

1. The opened drives development tendencies / L. V. Chuykina, B. G. Porpilev, D. O. Chuykin // Reshernevskie chtenija : materials of the Intern. scientific conf. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Sib. state aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2018.

© Величко А. И., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., 2019



## ПРИМЕНЕНИЕ АНТИДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ В ПОДВИЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. И. Викторов<sup>1</sup>, В. С. Шоркин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственное предприятие «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: viktorov.ai@astronel.ru

<sup>2</sup>Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева  
Российская Федерация, 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
E-mail: vshorkin@yandex.ru

*Рассмотрены факторы, влияющие на ресурс изделий в течение срока активного существования космического аппарата. Предложен материал для его использования в качестве антидиффузионного слоя. Описаны его преимущества.*

*Ключевые слова: антидиффузионный слой, датчик конечного положения, ресурс.*

## THE APPLICATION OF THE ANTI-DIFFUSION LAYER IN THE MOVABLE MECHANISMS OF SPACE TECHNOLOGY

A. I. Viktorov<sup>1</sup>, V. S. Shorkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Scientific-production enterprise 'ASTRON ELECTRONICS"  
2, Veselaya Str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: viktorov.ai@astronel.ru

<sup>2</sup>Orel State University named after I. S. Turgenev  
95, Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russian Federation  
E-mail: vshorkin@yandex.ru

*The factors affecting the product life during the active life of the spacecraft are considered. A material for its use as an anti-diffusion layer is proposed. Its advantages are described.*

*Keywords: anti-diffusion layer, sensor end position, resource.*

К изделиям космической техники, предъявляется ряд требований, соответствие которым определяет их качество. Одним из них является надежность. Основным техническим оценочным показателем долговечности является ресурс в течение срока активного существования космического аппарата (САС КА).

Для обеспечения работоспособности датчика конечного положения (ДКП) и датчика скорости (ДКПТИ) за время САС 11 лет, необходимо выявить факторы, определяющие их ресурс. Проанализировав конструкцию датчиков (рис. 1), применяемые в них материалы и факторы космического пространства (ФКП) можно определить 3 основных направления влияющих на ресурс:

- надежность преобразователя Холла (ПХ);
- взаимное проникновение элементов соприкасающихся материалов (ионов) в смежные слои (диффузия);
- радиационное распухание аустенитной коррозионностойкой стали.

ООО «НПП «Астрон Электроника» имеет большой опыт по разработке и изготовлению датчиков на ПХ, которые подтвердили свою работоспособность в космическом пространстве в составе изделий МСУ-ГС (КА Электро-Л № 2), АЦС (КА Экзо-Марс 2016),

ФЕБУС и МСАСИ (КА Бепи Коломбо). На орбите Марса в составе КА «Марс-Экспресс» датчик положения на ПХ в составе прибора «ОМЕГА» отработал более 12 лет.

Отметим, что качество датчиков обеспечивается высокой технологической проработкой и глубоким пониманием процессов адгезии и диффузии. В свою очередь технология изготовления должна базироваться только на высококачественных исходных материалах. При проектировании таких датчиков необходимо обеспечить отсутствие взаимодиффузии материалов подвижного штока и направляющей, поскольку взаимное проникновение контактирующих материалов с течением времени может привести к потере работоспособности датчиков.

Нетрудно заметить, что движущей силой деструктивных процессов в датчиках является диффузия. Значит, ее ослабление или полная ликвидация должны способствовать увеличению срока службы. Существенно ослабить процесс взаимной диффузии контактирующих материалов можно путем исключения их адгезии.

Действительно, материал реального твердого тела всегда имеет дефекты структуры, например, в виде вакансий. При этом энергия случайных колебаний

отдельных частиц может превысить значение энергии активации и они, совершают элементарный акт самодиффузии – скачок из одного положения в другое.

При наличии адгезии для совершения элементарного акта диффузии частица должна обладать энергией активации, характерной для переходной фазы от одной решетки к другой, возникшей из-за возникновения связей между их атомами [1; 2], соизмеримой (или меньшей) с энергиями активации самодиффузии и меньшей энергии сублимации. Для минимизации числа сублимировавших частиц, достигших поверхности защищаемого тела, необходимо затруднить их переход из одного тела в другое. Для этого зазор между граничными поверхностями тел соприкасающихся тел предлагается заполнить антиадгезионным материалом [3].

Материал защитного слоя, расположенного между бронзовым штоком (БрБ2) и стальной направляющей (12Х18Н10Т) выбран тальк, обладающий в направлении перпендикулярном его слоям близким к нулю значением коэффициента Пуассона [4]. Антидиффузионный слой представляет собой оксидную пленку с тальком, который препятствует взаимной диффузии металлов, образующий защитную оболочку штока из БрБ2.

Заметим, что взаимная встречная диффузия на границах металлических слоев идет в направлении выравнивания концентраций и, в конечном счете, приводит к наиболее характерному виду высокотем-

пературного разрушения металлических слоев – рассасыванию. Рассасывание слоев может быть заторможено барьерным промежуточным слоем и путем связывания быстродиффундирующих элементов в прочные соединения, чему и служит антидиффузионный слой.

В подтверждение сказанного, ниже приведены результаты экспериментальных исследований терможаростойкого провода включающей основу 1, выполненную, из хромо-ниобиевой бронзы на основе меди, марки БрХНб 0,4-0,25, защитную оболочку 2, выполненную из коррозионностойкой стали типа 12Х18Н10Т, между основой и защитной оболочкой расположен антидиффузионный слой 3, включающий оксидную пленку и тальк (рис. 2). На рис. 2 приведены изображения электронной микроскопии поперечного сечения провода обмоточного терможаростойкого с антидиффузионным слоем. Представленные результаты свидетельствуют, что в результате термостарения не произошло взаимодиффузии материалов основы и защитной оболочки.

На рис. 3 приведены изображения электронной микроскопии слоистой токопроводящей жилы, в которой материал основы – медь, материал защитной оболочки – коррозионно-стойкая сталь. Приведенные данные свидетельствуют о том, что при термостарении даже при температуре 500 °С в течение 707 ч уже имеет место диффузия основного элемента материала основы (меди) в защитный слой токопроводящей жилы [4].

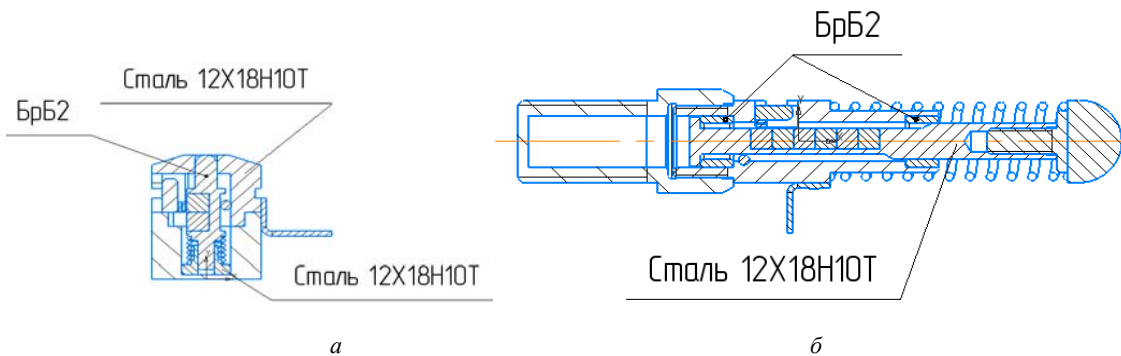


Рис. 1. Конструкция датчиков на ПХ:  
а – датчик конечного положения; б – датчик скорости

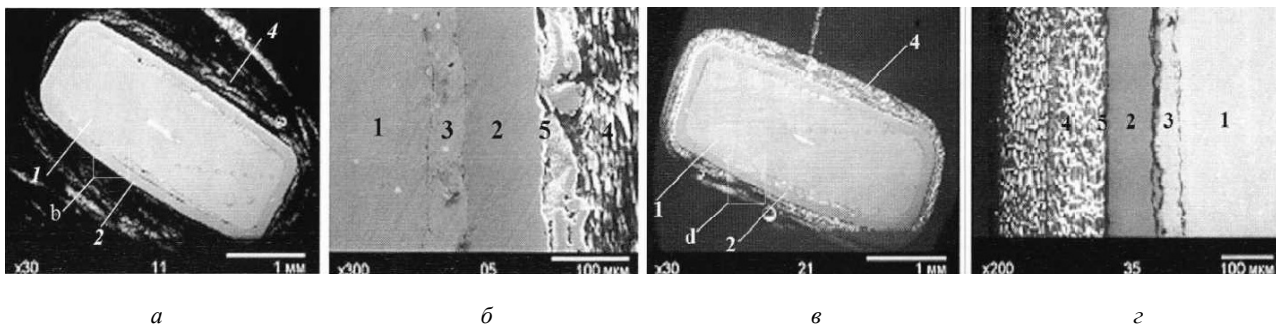


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки поперечного сечения провода обмоточного термо-жаростойкого:  
а, б – в состоянии до термостарения; в, г – после 2500 ч старения при 650 °С;  
1 – основа; 2 – защитная оболочка; 3 – антидиффузионный слой; 4 – изоляция; 5 – антиадгезионный слой

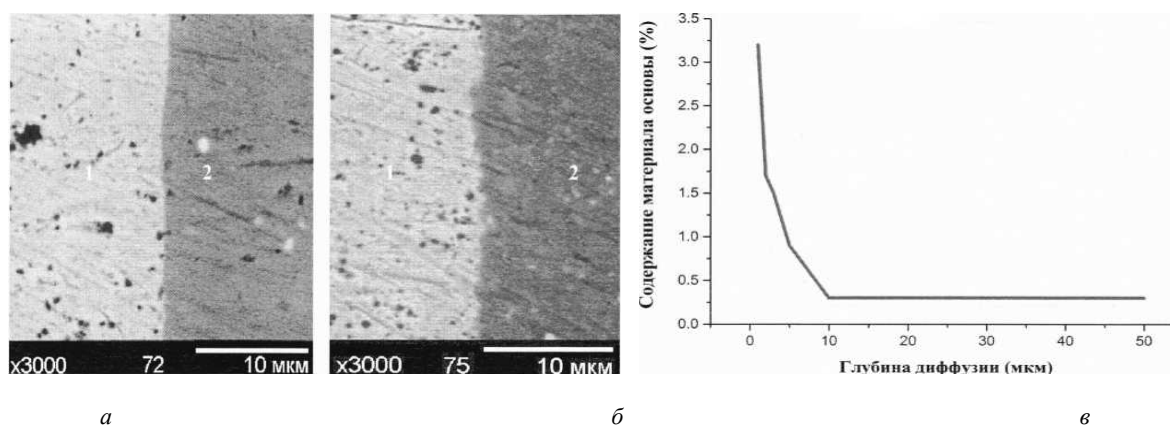


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки поперечного сечения провода обмоточного термо-жаростойкого без антидиффузионного слоя: *a* – в состоянии до термостарения; *б* – после 707 ч термостарения при 500 °С; *в* – профиль распределения материала основы (меди) в защитной оболочке после 707 ч термостарения при 500 °С

Потоки быстрых нейтронов вызывают в аустенитных коррозионноустойчивых сталях и никелевых сплавах изменение механических свойств, радиационное распухание и радиационную ползучесть.

Радиационное распухание проявляется при флюенсе более  $10^{26}$  нейтр./ $m^2$  в интервале температур облучения 0,3–0,55  $T_{пл}$  металла. Для аустенитных коррозионноустойчивых сталей радиационное распухание может достигать больших значений – (30–40) % при флюенсе  $(1,5–2,5) \cdot 10^{27}$  нейтр./ $m^2$ . Механизм распухания объясняется накоплением в процессе облучения избыточных вакансий и зарождением в металле вакансионных скоплений, имеющих вид сферических микропор. Центрами зарождения пор являются атомы примесей, атомы гелия, образующегося при взаимодействии нейтронов с никелем, хромом, железом [5].

Учитывая параметры радиации околоземной орбиты и максимальную рабочую температуру датчиков 140 °С, радиационное распухание проявляться не будет, так как условия его появления в 2,5 раза выше эксплуатационных параметров.

#### Библиографические ссылки

1. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. Б. А. Введенский. М. : Сов. энциклопедия, 1960. Т. 1. С. 19.
2. Дехтяр И. Я. // Успехи физических наук. 1957. Т. LXII. Вып. 2. С. 99–128.
3. Теоретическое построение и расчетно-экспериментальное подтверждение условия выбора материала антидиффузионного слоя терможаростойкого биметаллического провода / И. В. Витковский, С. Н. Ромашин, В. С. Федеряева, В. С. Шоркин //

Журнал технической физики. 2018 . Т. 88, № 10. С. 1533–1538.

4. Провод обмоточный терможаростойкий : Пат. 2611054 Рос. Федерация. МПК H01B 7/29 / К. Н. Белослудцев, И. В. Витковский, С. А. Гончаров и др. ; № 2015136545 ; заявл. 27.08.2015 ; опубл. 21.02.2017, Бюл. № 6. 12 с.

5. Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 649 с.

#### References

1. Physical encyclopedic dictionary / Chief editor B. A. Vvedenskiy. Moscow : Soviet encyclopedia, T. 1. P. 19 (in Russ.).
2. Dehtyar I. Y. // Advances in physical Sciences. 1957. T. LXII, release 2. P. 99–128 (in Russ.).
3. Vitkovskiy I. Y., Romashin S. N., Federyaeva V. S., Shorkin V. S. Theoretical construct and design-experimental confirmation of the selection conditions for the material of the antidiffusion layer thermoerosional bimetallic wire // Journal of technical physics. 2018. T. 88, № 10. P. 1533–1538. (in Russ.).
4. Wire wrapping thermoerosional: Pat. 2611054 Russian Federation, IPC H01B 7/29 / I. V. Belosludcev, I. Y. Vitkovskiy, S. A. Goncharov et al. ; № 2015136545 ; appl. 27.08.2015 ; publ. 21.02.2017, Bull. № 6 12 p. (in Russ.).
5. Handbook of structural materials / under edition B. N. Arzamasov, T. V. Soloveva. Moscow : MGTU im. N. Uh. Bauman, 2005. 649 p. (in Russ.).

© Викторов А. И., Шоркин В. С., 2019

УДК 62-03

## СОЗДАНИЕ СОТОПАНЕЛЕЙ И РАДИАТОРОВ ИЗ СВЕРХТЕПЛОПРОВОДНОГО УГЛЕПЛАСТИКА

К. Гончаров<sup>1</sup>, Ю. Панин<sup>2</sup>, А. Хмельницкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО НПП «Тепловые агрегаты и системы»  
Российская Федерация, 141407, г. Химки, ул. Бабакина, 5а  
<sup>2</sup>НПО им. С. А. Лавочкина  
Российская Федерация, 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, 24  
<sup>3</sup>АО «ОНПП «Технология»  
Российская Федерация, 249031, г. Обнинск, Киевское шоссе, 15  
E-mail: tais@heatpipe.ru

*Представлены основные результаты разработки, изготовления и применения обшивок из сверхтеплопроводного углепластика для сотопанелей и радиаторов космического применения.*

*Ключевые слова: сверхпроводной углепластик, сотопанели, радиаторы.*

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HONEYCOMB PANELS AND RADIATORS WITH HIGH CONDUCTIVITY CARBON-EPOXY SKINS

K. Goncharov<sup>1</sup>, Yu. Panin<sup>2</sup>, A. Khmelnskiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tais Ltd  
5a, Babakin Str., Khimki, 141407, Russian Federation  
<sup>2</sup>Heat pipe Centre Lavochkin Association  
24, Leningradskaya Str., Khimki, 141402, Russian Federation  
<sup>3</sup>ORPE "Technologiya"  
15, Kievskoye Shosse, Obninsk, 249031, Russian Federation  
E-mail: tais@heatpipe.ru

*Carbon-epoxy skins with ultrahigh thermal conductivity developed for honeycomb panels and radiators. Combination new skins and Aluminum condenser of LHP is new designs. Radiators are ready for application.*

*Keywords: carbon-epoxy skins, honeycomb panels, radiators.*

**Введение.** Комбинация в сотопанелях обшивок из углепластика и алюминиевых тепловых труб (ТТ) с аксиальными канавками, а также алюминиевых конденсаторов контурных тепловых труб (КТТ) представляет такую новую конструкцию элементов системы терморегулирования (СТР).

Углепластики отличаются от традиционных конструктивных материалов сочетанием таких свойств, как малый удельный вес, высокие удельная прочность и жесткость, высокая усталостная прочность при статических и динамических нагрузках, высокая износостойкость и устойчивость к воздействию агрессивных сред, высокая стойкость к термическим и радиационным ударам. Однако большинство композитных материалов на основе угольных волокон и полимерной матрицы обладают низким коэффициентом линейного термического расширения (КЛТР) и низкой теплопроводностью.

Мы создали новый материал с высокой теплопроводностью, которая достигается использованием высокомолекулярных углеродных волокон, а также конструкции на его основе. Большая разница в КЛТР углепластиковых обшивок и алюминия не позволяла использовать эти преимущества в сочетании с алюминиевыми корпусами ТТ. Новый углепластик позво-

ляет решить эту проблему и применить преимущества нового материала в конструкции сотопанелей и радиаторов космического назначения, работающих в широком диапазоне температур.

**Разработка обшивки из сверхтеплопроводного углепластика.** Известно, что углеродные волокна на основе лака могут применяться для обеспечения высоких уровней удельной теплопроводности. Главная проблема заключается в создании эффективного и стабильного механического и теплового интерфейса между композиционными обшивками и металлическими элементами, такими, как ТТ или конденсаторы КТТ, при различных коэффициентах теплового расширения.

Было проведено исследование множества образцов с целью оценки свойств композиционных материалов обшивок. Разработан материал, у которого КЛТР в одном направлении близок к алюминиевым сплавам. В отличие от обычно используемых материалов, новый композиционный материал имеет не только хорошие конструкционные характеристики, но также высокие тепловые характеристики. В частности, теплопроводность превышает алюминий вдвое вследствие применения монокристаллических графитовых волокон. Таким образом, традиционное мнение о пло-

хой теплопроводности панелей из пластика, армированного углеродными волокнами, больше не является справедливым.

Для изготовления и испытаний первого радиатора с углепластиковыми волокнами были выбраны волокна CN80. Эти волокна отличаются относительно невысокой стоимостью и доступны на рынке. Тем не менее, теплопроводность материала обшивки из волокна CN80 вдвое выше, чем у панели – аналога из алюминия.

В качестве теплопроводной соединительной среды между компонентами был выбран отечественный фенольно-эпоксидный клей, обладающий высокой прочностью и невысокой температурой полимеризации. Такое соединение позволяет обеспечить требуемую теплопроводность в условиях значительных деформаций, вызванных различной величиной КЛТР алюминиевого конденсатора и углепластиковых обшивок.

Теплопроводность созданной углепластиковой обшивки составляет 380 Вт/м·К в продольном направлении, а коэффициент линейного расширения в поперечном направлении составляет  $18 \cdot 10^{-6}$  1/м<sup>2</sup>. В продольном направлении и по толщине обшивки коэффициенты теплопроводности существенно ниже (не более 40 Вт/м·К) а КЛТР в поперечном направлении близок к нулю.

Была разработана, изготовлена, испытана сотованель. Испытания включали проверку ее теплопроводности и конструктивной работоспособности в условиях циклического изменения температур. Было проведено 50 циклов в интервале от –20 до +60 °С и один цикл в интервале от –40 до +80 °С. Температуры измерялись на поверхности обшивки вблизи тепловой трубы.

В отличие от многих предыдущих исследований (MBBERNO, DLR, NLR и др.) нам удалось впервые в нашей стране и в Европе не только создать углепластиковые обшивки более чем вдвое превосходящие алюминиевые по теплопроводности и весу, но и решить задачу совместимости углепластиковых обшивок с алюминиевыми тепловыми трубами с теплоносителем внутри и силовыми элементами внутри сотованели.

Тепловые сотованели с углепластиковыми обшивками высокой теплопроводности позволяют снизить вестепловых сотованелей на 20 % и рекомендуются для использования в перспективных КА.

**Разработка радиатора с углепластиковыми обшивками на базе КТТ.** Разработка радиатора на базе регулируемых КТТ с углепластиковыми обшивками является более сложной задачей по сравнению с обычными сотованелями. Задача усложняется более широким диапазоном рабочих температур по сравнению с сотованелями и большим количеством термоциклов. Так, для радиатора метеорологического КА «Арктика-М» температурный рабочий диапазон сотованели может составлять от минус 160 до плюс 70 °С, а количество термоциклов может измеряться несколькими тысячами при ресурсе аппарата более 10 лет.

Низкие температуры обусловлены способностью КТТ регулировать сбрасываемые тепловые потоки. Несмотря на сложность, такая задача была решена.

Радиатор представляет собой сотованельную конструкцию с сотозаполнителем из алюминиевого сплава, внутрь которой вклеен конденсатор КТТ, выполненный из алюминиевого экструдированного профиля. Обшивки и окантовки изготовлены из сверхтеплопроводного углепластика.

Большая теплопроводность углепластика позволяет располагать линии конденсаторопровода реже, чем на радиаторах-аналогах из алюминия, что позволяет дополнительно снизить массу радиатора в целом, особенно это важно для мощных, раскрывающихся радиаторов. Радиатор выдержал 7000 циклов изменения температуры от минус 150 до плюс 50 °С.

Было проведено облучение радиатора гамма квантами с энергией 1,62 МэВ дозой  $2 \cdot 10^6$  Рад. После чего проведена проверка работоспособности радиатора в атмосферных условиях и в вакууме. Испытания показали, что существенных изменений характеристик радиатора в результате воздействия ионизирующего излучения не произошло.

Испытания радиаторов с углепластиковыми обшивками на различных режимах показали их на полную работоспособность. Удельные массовые параметры углепластиковых радиаторов на базе КТТ сегодня не имеют аналогов.

Радиаторы для летного образца метеорологического КА «Арктика-М» изготовлены, установлены на изделия и проходят подготовку к пуску, намеченному на начало 2020 г.

#### Библиографические ссылки

1. Патент РФ № 2291782.
2. Goncharov K., Rassolov O., Khmel'nitsky A. Carbon Fiber Panel with Aluminum Heat Pipes//17th International Heat Pipe Conference, Kanpur, India, 13–17 October 2013.
3. High Thermal Conductive Carbon Fiber Radiators with Controlled Loop Heat Pipes, K. Goncharov, Yu. Panin, M. Balykin, A. Khmel'nitsky, 46th International Conference on Environmental Systems ICES-2016-279, 10–14 July 2016, Vienna, Austria.

#### References

1. RF patent No. 2291782.
2. Goncharov K., Rassolov O., Khmel'nitsky A. Carbon Fiber Panel with Aluminum Heat Pipes//17th International Heat Pipe Conference, Kanpur, India, 13–17 October 2013.
3. High Thermal Conductive Carbon Fiber Radiators with Controlled Loop Heat Pipes, K. Goncharov, Yu. Panin, M. Balykin, A. Khmel'nitsky, 46th International Conference on Environmental Systems ICES-2016-279, 10–14 July 2016, Vienna, Austria.

© Гончаров К., Панин Ю., Хмельницкий А., 2019

УДК 629.76/78.001.63

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ШТАНГИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА

А. С. Евдокимов, Д. О. Шендалев, М. Г. Валишевская, О. К. Валишевский

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

*Рассматривается штанга крупногабаритного трансформируемого рефлектора космических антенн. Приводится алгоритм выбора схемы армирования трубы.*

*Ключевые слова: штанга, конечно-элементная модель, деформации, углепластик, схема армирования.*

## FORMULATION OF THE PROBLEM OF SELECTION OF LARGE REFLECTOR PRECISION BOOM LAMINATE

A. S. Evdokimov, D. O. Shendalev, M. G. Valishevskaya, O. K. Valishevsky

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: evdokimov-as@iss-reshetnev.ru

*Large deployable reflector boom of space antenna is considered. The algorithm of composite boom tube layout selection is given.*

*Keywords: boom, finite element model, deformations, CFRP, laminate.*

Штанга – конструкция, которая удерживает рефлектор в рабочем положении с высокой точностью на всем сроке эксплуатации. К крупногабаритным конструкциям как штанга предъявляются высокие требования по жесткости и точности. Длина штанги в рабочем положении может достигать нескольких метров. Штанга является ключевым конструктивным элементом, определяющим температурную стабильность положения рефлектора и минимальную собственную частоту колебаний конструкции.

Целью выбора схемы армирования трубы штанги является минимизация температурных деформаций и максимизация жесткости штанги в пределах заданных габаритов и массы.

Для обеспечения требуемой собственной частоты колебаний рефлектора на штанге, жесткость штанги должна быть высокой как на изгиб, так и на кручение. Для минимизации температурных деформаций рассматривается предельный расчетный случай теплового потока, направленного с одной стороны перпендикулярно продольной оси штанги (боковая засветка) полагая, что в этом случае деформации будут максимальными. Схема армирования штанги должна обеспечивать минимальные межслоевые напряжения при температурных воздействиях. При оптимизации схемы армирования предполагалось рассмотреть различные комбинации углов намотки в различных слоях. В частности, необходимо рассмотреть следующие комбинации: две пары слоев с вариацией углов намотки  $[\pm A/\pm B]$ , где «А» – угол армирования внутренних слоев углепластика, предназначенных для обеспечения изгибной жесткости, а «В» – угол армирования внеш-

них слоев углепластика, предназначенных для обеспечения крутильной жесткости и максимальной теплопроводности по поперечному сечению. Диапазон изменения углов намотки «А» и «В»: от  $1^\circ$  до  $70^\circ$ .

На основании вышесказанного, для определения схемы армирования трубы штанги сформулированы следующие основные критерии:

- 1) выполнение требований по жесткости;
- 2) минимальный уровень температурных деформаций;
- 3) минимальная разница между углами намотки слоев;
- 4) угол намотки верхнего слоя больше угла намотки нижнего слоя;
- 5) КЛТР вдоль оси трубы стремится к нулю.

Звено штанги представляет собой углепластиковую тонкостенную сплошную трубу, изготовленную методом мокрой намотки. По своей природе структура углепластика имеет ярко выраженную анизотропию. Теплофизические свойства углепластика (коэффициент теплопроводности и коэффициент линейного температурного расширения) отличаются по направлениям (вдоль волокна, поперек волокна) в несколько раз. При правильном и рациональном использовании такой закономерности необходимо найти комбинацию углов укладки слоев, которая будет удовлетворять критериям выше.

Полученные в результате статического расчета углы поворота конца штанги, являются исходными данными для расчета жесткости поперечного сечения на изгиб и жесткости поперечного сечения на кручение.

Жесткость поперечного сечения на изгиб под действием момента  $M_y$  вычисляется по формуле

$$EJ_y = \frac{M_y L}{\varphi_y},$$

где  $L$  – длина звена;  $M_y$  – момент;  $\varphi_y$  – угол поворота под действием момента  $M_y$ .

Жесткость поперечного сечения на кручение под действием момента  $M_x$  вычисляется по формуле

$$GJ_x = \frac{M_x L}{\varphi_x},$$

где  $L$  – длина звена;  $M_x$  – момент;  $\varphi_x$  – угол поворота под действием момента  $M_x$ .

Результаты расчета жесткости в зависимости от схемы армирования заносятся в таблицу (см. таблицу), где выделяются те значения, которые удовлетворяют требованиям по жесткости.

**Пример таблицы результатов расчета на жесткость**

Угол, °	Жесткость поперечного сечения на изгиб (кручение), Н·м <sup>2</sup>									
	В	1	2	3	4	...	...	...	...	70
А										
1										
2										
...										
70										

Следующим этапом анализа является расчет температурных деформаций. Создание тепловой и механической моделей и непосредственно сами расчеты выполняются в программном комплексе ANSYS. В силу необходимости последовательного решения тепловой и механической задач был выбран данный программный комплекс ANSYS, который позволяет осуществлять передачу данных поля температуры по слоям на механическую модель. Исходными данными

для расчёта температурных деформаций штанги является информация о распределении температуры по элементам звеньев штанги, полученная в результате теплового анализа.

В результате расчета температурных деформаций вычисляются линейные и угловые отклонения штанги с различными углами армирования. Результаты расчета в зависимости от схемы армирования заносятся в таблицу, где выделяются минимальные значения (см. таблицу выше).

По результатам расчетов выделяются те схемы армирования, которые удовлетворяют критериям 1 и 2. Если таких вариантов несколько, то необходимо пользоваться критериями 3–5.

На основании результатов расчетов, выбирается схема армирования трубы штанги, которая одновременно удовлетворяет всем критериям.

### Библиографические ссылки

1. Басов К. А. ANSYS: справочник пользователя. – М. : ДМК Пресс, 2014. 640 с.
2. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. М. : Машиностроение, 1990. 512 с.
3. ANSYS, «ANSYS Academic Research», 13.0 Ed, 2010.

### References

1. Basov K. A. ANSYS: spravochnik polzovatelya. – M. : DMK Press, 2014. 640 p.
2. Kompozicionnie materialy : spravochnik / V. V. Vasilyev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin i dr. M. : Mashinostroeine, 1990. 512 p.
3. ANSYS, «ANSYS Academic Research», 13.0 Ed, 2010.

© Евдокимов А. С., Шендалев Д. О., Валишевская М. Г., Валишевский О. К., 2019

УДК 629.78, 681.51

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИВОДА ТОЧКИ АКТУАЦИИ БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ\*

Е. И. Евстигнеева, Ю. В. Коноплев\*, А. А. Юев, Д. А. Сандул, А. С. Толмачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1  
\*E-mail: urzig\_eastwood@mail.ru

*Тенденции развития космической отрасли задают новые ориентиры в разработке технологичных и совершенствуемых систем корректировки формы отражающей поверхности сетеполотна рефлекторов, направленные на оптимизацию конструкций и достижение необходимых точностей.*

*Ключевые слова: прецизионные исполнительные устройства, управляющий сигнал, микроконтроллер, крупногабаритные космические трансформируемые антенны, диаграмма направленности.*

## DEVELOPMENT OF THE ACTUATION POINT' DRIVE SYSTEM FOR THE WIRELESS SHAPE CONTROL OF LARGE TRANSFORMED STRUCTURES

E. I. Evstigneeva, Yu. V. Konoplev\*, A. A. Yuev, D. A. Sandul, A. S. Tolmachev

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinova  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation  
\*E-mail: urzig\_eastwood@mail.ru

*The space industry trends are putting new landmarks in the development of sophisticated and upgradable systems for correction of the reflecting surface of the reflectors' network tissue, the said landmarks being aimed at the structures' optimization and at achieving the required precision levels.*

*Keywords: precision actuator devices, control signal, microcontroller, the space-based large transformed antenna, antenna pattern.*

Основными из направлений в развитии крупногабаритных трансформируемых антенн с вантовой формообразующей структурой являются увеличение рабочей поверхности конструкции и уменьшение погрешности позиционирования корректирующих форму отражающей поверхности сетеполотна элементов. При оптимизации конструкции рефлекторов необходимо также ориентироваться на минимизацию масс исполнительных элементов и составных частей подобных технических систем космического применения [1].

Для точной подстройки формы радиоотражающего сетеполотна и получения оптимальных массогабаритных показателей в узлах сети предлагается расположить привод, основой которого является миниатюрное ЭМИУ, способное развивать усилие, достаточное для подтягивания узлов. Узлы фронтальной сети, с расположенными в их основании приводами, являются точками воздействия исполнительного устройства (актуатора) на рабочую длину стягивающей сетеполотно ванты. Таким образом, работа системы

привода точки актуации приводит к изменению формы фронтальной поверхности рефлектора.

Конструктивно, спроектированный и предлагаемый вниманию привод точки актуации представляет собой систему, состоящую из пластин с фотопреобразователями, промежуточного накопителя электроэнергии, контроллера, драйвера актуатора, самого актуатора и марки-отражателя.

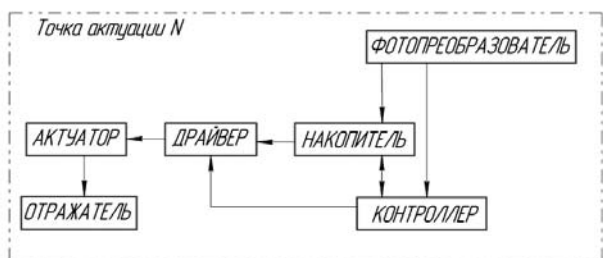
Структурная схема системы привода точек актуации представлена на рисунке.

На поверхность сетеполотна рефлектора устанавливается марка-отражатель, при попадании в которую, по обратной связи, тахеометр, путем анализа разницы координат, определяет пространственное положение каждой точки актуации.

Наличие накопителя электроэнергии, емкости которого будет достаточно для отработки полного цикла работы системы, позволяет заменить высокотехнологичные фотопреобразователи на малогабаритные фотодиоды, которые обладают достаточным КПД и позволяют сделать систему более компактной и легкой.

\*Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0165 от 26.09.2017, соглашение ЭБ 075-02-2018-1074 от 15.11.2018. Уникальный идентификатор RFMEF157417X0165: «Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов».





Структурная схема системы привода точек актуации

Основное требование к разрабатываемому накопителю – способность развивать большой начальный ток для запитки актуатора (от 1 до 3 А) [2]. В связи с этим, наиболее целесообразно использование комбинированной системы накопления электроэнергии.

Энергия подается на систему привода точки актуации открытым оптическим каналом, посредством позиционирования мощного лазерного излучения на фотоэлемент, – что делает систему беспроводной и менее массивной [3; 5].

Для передачи информации о требуемом направлении и величине хода актуатора используется модуляция луча лазера накачки. Импульсы лазерного излучения воспринимаются микроконтроллером и преобразовываются в последовательность бит данных [4].

Основой системы привода каждой точки актуации являются актуаторы – легкие электромеханические исполнительные устройства. Они воздействуют на точку актуации путем изменения рабочей длины ванты.

Таким образом, разработанная система привода точки актуации не только позволяет решать задачу точного формирования диаграммы направленности рефлектора, но и улучшать массогабаритные характеристики конструкции рефлектора. Эти возможности являются особенно важным в условиях космического пространства.

#### Библиографические ссылки

1. Бей Н. А., Зимин В. Н. Трансформируемые антенны больших размеров для геостационарных космических аппаратов // *Антенны*. 2005. Вып. 10(101). С. 24–27
2. Жданов В. В., Коштыл Ю. М., Кузнецов В. П. Анализ основных показателей современных суперконденсаторов и литий-ионных аккумуляторов для задач создания высокомошных источников тока [Электронный ресурс]. СПб. : ФГБУН «ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН», 2017. 15 с. URL: <http://www.rusbat.com/>

Interbat22032017/IoffeInterbat2017.pdf (дата обращения: 15.03.2019).

3. Организация энергоинформационного обмена между устройствами управления формой трансформируемой антенны с применением волоконно-оптических технологий / С. А. Матвеев, С. Ю. Страхов, Д. А. Хромихин и др. // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83, № 11. С. 73–78.

4. Передача энергии и информации по оптическому каналу для управления формой космической антенны / Л. Б. Кочин, М. А. Крылова, Д. А. Хромихин и др. // *Решетневские чтения : материалы XXI международной науч. конференции по физике высоких плотностей энергии*. Красноярск, 2017.

5. Boreysho A. S., Kochin L. B., Strakhov S. Yu. System for transmitting energy and information using laser radiation for control of the shape of large space-based antennas // 2016 International conference Laser Optics, LO 2016, St. Petersburg, 2016.

#### References

1. Bey N. A., Zimin V. N. Large transformable antennas for geostationary spacecraft // *Antennas*. 2005. Iss. 10 (101). P. 24–27.
2. Zhdanov V. V., Koshtyal Yu. M., Kuznetsov V. P. Analysis of the main indicators of modern supercapacitors and lithium-ion batteries for the tasks of creating high-power current sources. St. Petersburg: Federal State Budgetary Institution “Physicotechnical Institute named after A.F. Ioffe RAS”. 2017. 15 p. [Electronic resource]. URL: <http://www.rusbat.com/Interbat22032017/IoffeInterbat2017.pdf> (access: 15.03.2019).
3. Organization of energy-information exchange between the control devices of the shape of the transformable antenna using fiber-optic technologies / S. A. Matveev, S. Yu. Strakhov, D. A. Khromikhin et al. // *Optical magazine*. 2016. Vol. 83, № 11. P. 73–78.
4. Transmission of energy and information through an optical channel for controlling the shape of a space antenna / L. B. Kochin, M. A. Krylova, D. A. Khromikhin et al. // *Reshetnev readings : materials of the XXI international scientific. conf. on High Energy Density Physics*. Krasnoyarsk, 2017.
5. Boreysho A. S., Kochin L. B., Strakhov S. Yu. System for transmitting energy and information using laser radiation for control of the shape of large space-based antennas // 2016 International conference Laser Optics, LO 2016, St. Petersburg, 2016.

© Евстигнеева Е. И., Коноплев Ю. В., Юев А. А., Сандул Д. А., Толмачев А. С., 2019

УДК 629.7.064.5

**ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ  
В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

С. В. Ефремов<sup>1</sup>, Н. А. Карпов<sup>1</sup>, А. П. Леонов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30  
E-mail: nikolats.karpov@yandex.ru

*По результатам анализа условий эксплуатации и требований к материалам при использовании в условиях криогенных температур, приведены проводниковые и изоляционные материалы, которые возможно использовать при построении БКС.*

*Ключевые слова: бортовая кабельная сеть, криогенные температуры, проводниковые материалы, изоляционные материалы.*

**THE CHOICE OF MATERIALS FOR ONBOARD CABLE NETWORK  
OF SPACECRAFT AT CRYOGENIC TEMPERATURE OPERATING**

S. V. Efremov<sup>1</sup>, N. A. Karpov<sup>1</sup>, A. P. Leonov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: nikolats.karpov@yandex.ru

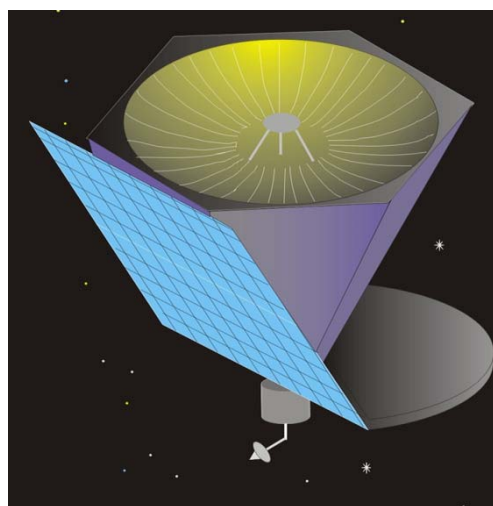
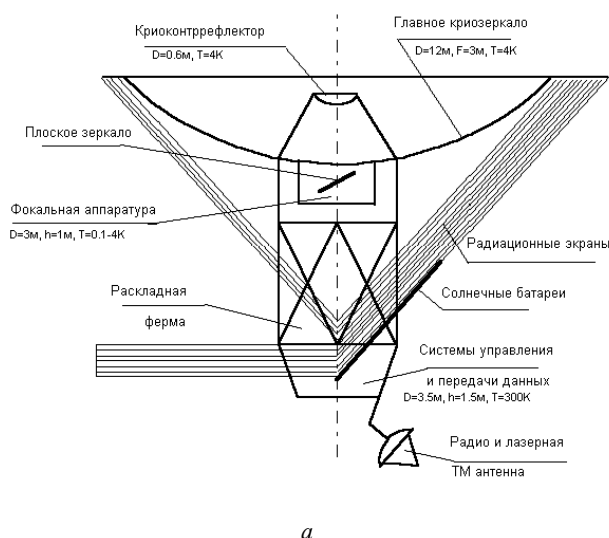
*Based on the analysis of operating conditions and requirements for materials when used in cryogenic temperatures, conductive and insulating materials are given that can be used in the construction of onboard cable system.*

*Keywords: onboard cable system, cryogenic temperatures, conducting materials, insulating materials.*

При создании исследовательских космических аппаратов дальнего космоса для обсерватории «Миллиметр» с оборудованием, которое должно работать при криогенных температурах, главной проблемой является поддержание низких температур в зоне чувствительных элементов. Используемые при этом криомашины имеют весьма низкую мощность охлаждения, поэтому на таких КА «холодная зона» отделена от «теплой зоны» системой радиаторов, позволяющих ограничивать поступление тепла от аппаратуры, работающей при «высоких температурах» около 300 К, в зону «низких температур» (0,1–20 К).

Для организации интерфейсов между зонами слухит бортовая кабельная сеть (БКС), которая должна обеспечивать телеметрию и заданное питание аппаратуры, передачу научной информации и управления, надежную работу в широком диапазоне температур от 4 до 350 К, быть стойкой к механическим перемещениям, обладать минимальным тепловыделением в холодной зоне и минимальной теплопроводностью на участке между охлаждаемым и неохлаждаемым контейнерами.

Для использования в условиях криогенных температур материалы должны быть выбраны с учетом: необходимых электрических свойств, позволяющих передать полезный сигнал с заданными параметрами, например, заданными падениями напряжений, параметров теплопроводности материалов для снижения тепловой нагрузки на зону криогенных температур, параметров изменения проводимости металлов при снижении температуры окружающей среды, которые могут оказать влияние на параметры сигналов, коэффициентов расширения/сжатия, которые при термоциклировании могут оказать влияние на прочность соединения разнородных материалов, стойкости к длительному воздействию криогенных температур и термоциклированию до этих температур (для диэлектриков), ограничений по газовыделению (для диэлектриков), генерируемых в точке соединения разнородных металлов термоэлектрических потенциалов, которые могут оказать воздействие на точность измерений. Проведя анализ требований к материалам, используемых в условиях криогенных температур, были выбраны подходящие проводниковые и изоляционные материалы.



Обсерватория «Миллимитрон»

В качестве проводниковых материалов при изготовлении БКС для криогенных температур могут использоваться: Сверхпроводники на основе сердечника их сплава ниобия и титана (NbTi) с покрытием из фосфорной бронзы, Сверхпроводники на основе медно-никелевого сплава (CuNi), Константан, Марганец, Фосфорная бронза, Аустенитные марки нержавеющей стали (например, 304, 304L, 316, 321), Алюминиевые сплавы 6061, 6063, 1100, Медь (бескислородная, высокой проводимости), Латунь, Inconel 718 (аустенитный никель-хромовый сплав), бериллиевая медь, титановый сплав Ti-6Al-4V.

В качестве изоляционных материалов для БКС могут быть использованы: Kapton (полиимидная пленка, производства фирмы DuPont), Mylar (полиэфирная пленка производства фирмы DuPont), пластики на основе эпоксидной смолы, усиленные стекловолокном, такие как G-10 и G-11, Teflon (политетрафторэтилен, может использоваться в качестве изоляции для проводов стационарной прокладки или клея для слоев пленки Kapton), Pyral-ML (эмаль на основе ароматических полиимидов, производства фирмы DuPont), Gore-Tex (мембрана из политетрафторэтилена, производства фирмы Gore), Formvar (поливинилформаль), оксид алюминия, Kevlar 49 (ароматическое полиамидное волокно, другое наименование – арамид), полиамид (нейлон). Главными задачами изоляционных материалов при криогенных температурах, кроме обеспечения собственно электрической изоляции, являются обеспечение стойкости к механическим напряжениям, вызванным тепловым сжатием и термодинамическим напряжением при эксплуатации. Внутреннее механическое напряжение изоляционного материала может привести к его разрушению.

На следующем этапе планируется изготовление кабелей из данных материалов и проведение отработанных испытаний для подтверждения характеристик необходимых для построения БКС в условиях криогенных температур.

### Библиографические ссылки

1. Woodcraft A. L., Hollister M. I., Bintley D. et al. Thermal design and performance of the SCUBA-2 instrument 1-K and mK systems. *Cryogenics* 2009;49:504.
2. Ventura G., Barucci M., Gottardi E., et al. Low temperature thermal conductivity of Kevlar. *Cryogenics* 2000;40:489.
3. Боородицкий Н. П. Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Методические разработки к курсам «Конструкционные Материалы» и «Материаловедение» / под ред. А. А. Клыпина. М.: Изд-во МАИ, 1993.
5. Simon N. J., Drexler E. S., Reed R. P. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures: NIST Monograph 177, 1992.

### References

1. Woodcraft A. L., Hollister M. I., Bintley D. et al. Thermal design and performance of the SCUBA-2 instrument 1-K and mK systems. *Cryogenics* 2009;49:504.
2. Ventura G., Barucci M., Gottardi E., et al. Low temperature thermal conductivity of Kevlar. *Cryogenics* 2000;40:489.
3. Booroditskiy N. P. *Electrotechnicheskie materialy*. L.: Energoatomizdat, 1985.
4. *Metodicheskie razrabotki k kursam «Konstruktsionnye materialy» i «Materialovedenie»* [Guidance paper to course «Construction materials» and «Material engineering»] / Pod red. [Eds.] A. A. Kalipin. Moscow: Izdatelstvo [Publishers] MAI, 1993.
5. Simon N. J., Drexler E. S., Reed R. P. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures: NIST Monograph 177, 1992.

© Ефремов С. В., Карпов Н. А., Леонов А. П., 2019

УДК 629.78:621.3:535.8:53.06

## КОНТРОЛЬ И АДАПТАЦИЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН» МЕТОДОМ НОЖА ФУКО

П. С. Завьялов\*, Е. С. Жимулева

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41  
\*E-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

*Рассмотрена возможность использования метода ножа Фуко применительно к задаче адаптации и контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон». Предложена оптическая схема, реализующая данным методом, проведено её моделирование путем трассировки лучей при различных разъюстировках зеркальных элементов.*

*Ключевые слова: обсерватория «Миллиметрон», нож Фуко, юстировка, оптический контроль зеркал, трассировка лучей, метод Монте-Карло.*

## INSPECTION AND ADAPTATION OF THE “MILLIMETRON” SPACE OBSERVATORY MIRROR SYSTEM BY FOUCAULT KNIFE-EDGE TEST

P. S. Zavyalov\*, E. S. Zhimuleva

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
41, Russkaya Str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation  
\*E-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

*The authors consider the using possibility of the Foucault knife-edge test for the task of the “Millimetron” space observatory mirror system adaptation and inspection. An optical scheme implements this method. It models images by ray tracing for various misalignments of the mirror elements.*

*Keywords: “Millimetron” space observatory, optical mirror inspection, optical modeling, Foucault knife-edge test, Monte Carlo method.*

**Введение.** В настоящее время ведется проектирование и изготовление обсерватории «Миллиметрон» – космического аппарата (КА), главным элементом которого будет телескоп по схеме Кассегрена с диаметром зеркала 10 м. Телескоп будет работать в субмиллиметровом и дальнем ИК диапазоне длин волн [1–3].

Главное зеркало (ГЗ) телескопа – параболическое, трансформируемое, состоит из отдельных сегментов (до 96 шт.), каждый из которых будет иметь возможность адаптации по нескольким степеням свободы.

Бортовая система адаптации и контроля зеркальных элементов должна обеспечивать процесс первичной (после вывода КА и раскрытия телескопа) и периодической настройки формы главного зеркала с погрешностью не хуже 10–30 мкм. В качестве одного из методов контроля предлагается использовать метод ножа Фуко, который может обеспечить указанную точность и при этом достаточно прост в реализации [4–7].

В работе проведено моделирование оптической системы «Миллиметрон» с составным зеркалом. Рассчитаны типовые изображения для разных случаев разъюстировки зеркальных элементов. Продемонстрирована работа предложенного метода.

**Метод ножа Фуко.** На рис. 1 показана блок-схема проектируемой системы контроля и адаптации, реализующей метод ножа Фуко.

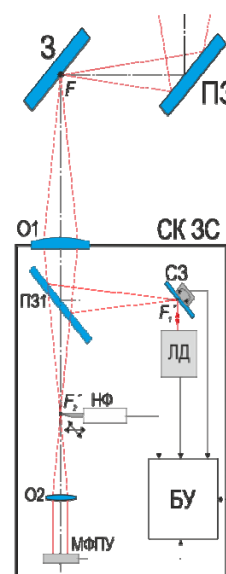


Рис. 1. Блок-схема системы контроля и адаптации БКНА-М

В качестве первичной (грубой) системы настройки здесь используется лазерный дальномерный канал, содержащий собственно сам лазерный дальномер (ЛД) и сканирующее зеркало (СЗ) [8]. Луч дальномера посылается в оптический тракт телескопа. При этом посредством объектива (О1) сканирующее зеркало оптически сопряжено с фокусом телескопа  $F$ . Такой ход лучей позволяет направлять луч дальномера в любую точку ГЗ. Дальномерный канал позволит выставить зеркальные элементы в расчетное положение с точностью 30–100 мкм. В этом случае размер пятна от точечного источника в фокальной плоскости телескопа будет иметь размер не более 50 мм.

Дальнейшая юстировка будет вестись методом ножа Фуко. При этом телескоп должен быть наведен на достаточно яркий точечный источник видимого диапазона (звезду  $0 \div +1$  звездной величины). Поток излучения от звезды проходит через зеркальную систему обсерватории (ГЗ – контррефлектор – переключающее зеркало (ПЗ)), и посредством зеркала (З) направляется в систему контроля (СК ЗС). Объектив (О1) переносит изображение из фокальной плоскости телескопа в плоскость ножа Фуко (НФ), который осуществляет сканирование фокального пятна поперек оптической оси в двух направлениях. Второй объектив (О2) формирует изображение ГЗ на матричном фотоприемном устройстве (МФПУ). Это изображение

называется фукограммой. Последовательность изображений с МФПУ передается в блок управления для обработки. На полученных фукограммах отслеживается изменения яркости отдельных сегментов ГЗ в зависимости от положения НФ. По этим данным вычисляются положения центров пятен, формируемых отдельными зеркальными элементами. В конечном итоге путем итерационной коррекции положения сегментов ГЗ можно добиться сведения пятен в некоторый минимально допустимый кружок рассеяния. Для главной длины волны телескопа 200 мкм такой кружок должен быть не более 3,4 мм.

На рис. 2 показаны изображения, полученные посредством моделирования предложенной оптической схемы путем трассировки лучей. Разъюстировка зеркальных элементов оптической схемы телескопа проводилась методом Монте-Карло в пределах заданных полей допусков.

Изображения для первой реализации оптической системы (децентрировки зеркальных элементов 0,5 мм, наклоны  $0,01^\circ$ ) показаны на рис. 2, *а*, *б*. Промоделирована ситуация, когда из-за разъюстировки оптической схемы пятна от некоторых зеркальных элементов не попадают в оптическую схему (находятся за апертурой входного зеркала). Зеркальные элементы, находящиеся за апертурой входного зеркала, не отображаются на фукограмме (рис. 2, *б*).

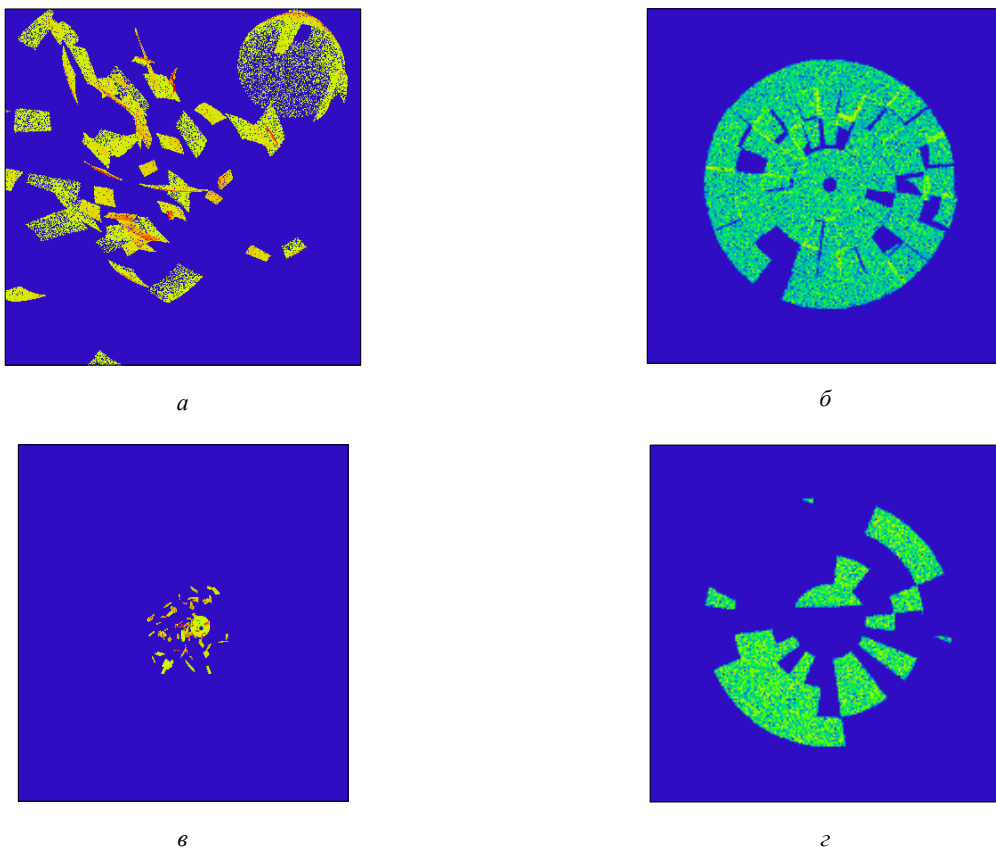


Рис. 2. Модельные изображения:  
*а* – изображение в фокальной плоскости 40×40 мм, децентрировки зеркальных элементов 0,5 мм, наклоны  $0,01^\circ$ ;  
*б* – фукограмма для случая (*а*) (нож Фуко убран); *в* – изображение в фокальной плоскости 40×40 мм, децентрировки зеркальных элементов 0,1 мм, наклоны  $0,002^\circ$ ; *з* – фукограмма для случая (*в*) (нож Фуко закрывает половину изображения снизу)

На рис. 2, в и 2, з показаны изображения для второй реализации (децентрировки 0,1 мм, наклоны 0,002°). Видно, что при таких допусках все пятна попадают в апертуру оптической системы. Приведена фукограмма для среднего положения ножа, по ней можно видеть пятна от каких сегментов ГЗ находятся выше оптической оси, а какие ниже.

На данном примере продемонстрирована возможность метода контролировать состояние столь сложной составной зеркальной системы.

#### Библиографические ссылки

1. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон / Н. С. Кардашёв, И. Д. Новиков, В. Н. Лукаш и др. // УФН. 2014. 184. С. 1319–1352.
2. Обработка и настройка опорной системы крупногабаритного рефлектора / П. С. Зырянова, А. В. Усольцев, А. В. Козлов и др. // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 125–126.
3. Космическая обсерватория Миллиметрон [Электронный ресурс]. URL: <http://millimetron.ru/index.php/tu/> (дата обращения: 06.09.2019).
4. Вокулер Ж. Фотографирование небесных тел (для любителей астрономии). М., 1967. 104 с.
5. Витриченко Э. А. Методы исследования астрономической оптики. М. : Наука, 1980. 152 с.
6. Батшев В. И. Оптические системы, свойства и методы контроля асферических поверхностей большого диаметра : дис. ... канд. техн. наук. М. : Москв. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2010. 121 с.
7. Максудов Д. Д. Теневые методы исследования оптических систем. М. : Государственное технико-теоретическое издательство, 1934. 171 с.
8. Контроль геометрических параметров зеркальной системы телескопа космической обсерватории «Миллиметрон» на борту космического аппарата / А. Г. Верхогляд, И. С. Глебус, С. Н. Макаров и др. // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч.

/ под общ.ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 98–100.

#### References

1. Review of scientific topics for Millimetron space observatory / N. S. Kardashev, I. D. Novikov, V. N. Lukash et al. // Phys. Usp. 2014. 57 P. 1199–1228.
2. Processing and setting the support system of a large-sized reflector / P. S. Zyryanova, A. V. Usoltsev, A. V. Kozlov et al. // Reshetnevskie chteniya : Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. [Materials XXI Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2017. Vol. 1. P. 125–126 (In Russ.).
3. Millimetron space observatory [Electronic resource]. URL: <http://millimetron.ru/index.php/en/> (access: 06.09.2019).
4. Vokuler Zh. *Fotografirovanie nebesnyh tel (dlya lyubitel'ey astronomii)* [Photographing celestial bodies (for astronomy fans)]. Moscow, 1967, 104 p.
5. Vitrichenko E. A. *Metody issledovaniya astronomicheskoy optiki* [Astronomical Optics Research Methods]. Moscow : Nauka, 1980. 152 p.
6. Batshev V. I. *Opticheskie sistemy, svoystva i metody kontrolya asfericheskikh poverhnostej bol'shogo diametra. Dis. kand. tehn. nauk.* [Optical systems, properties and methods for large diameter aspherical surfaces inspection]. Moscow : MGTU im. N. E. Bauman, 2010. 121 p.
7. Maksutov D. D. *Tenevye metody issledovaniya opticheskikh system* [Shadow methods for studying optical systems]. Moscow : Gosudarstvennoe tekhniko-teoreticheskoe izdatel'stvo, 1934. 171 p.
8. Testing space observatory “Millimetron” telescope mirror system on board of the spacecraft / A. G. Verkhogliad, I. S. Glebus, S. N. Makarov et al. // Reshetnevskie chteniya : Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. [Materials XXI Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2017. Vol. 1. P. 98–100 (In Russ.).

© Завьялов П. С., Жимулева Е. С., 2019

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИВОДА ИЗ МАТЕРИАЛА  
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ РАСКРЫТИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

В. С. Зарубин, В. Н. Зимин, И. М. Колосков, Н. Г. Павлов, В. С. Филиппов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
(Национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1  
E-mail: zimin@bmstu.ru

*Проведены предварительные экспериментальные исследования простейшего силового привода на базе сплава никелида титана, обладающего эффектом памяти формы. В результате исследований изучены деформационно-силовые характеристик сплава, определены условия его термосилового подгодовки, способствующие увеличению деформационных характеристик.*

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

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF AN ACTUATOR FOR DEPLOYMENT  
OF TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES WHICH IS MADE OF MATERIAL  
WITH A SHAPE MEMORY EFFECT**

V. S. Zarubin, V. N. Zimin, I. M. Koloskov, N. G. Pavlov, V. S. Filippov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)  
5/1, 2-ya Baumanskaya Str., Moscow, 105005 Russian Federation  
E-mail: zimin@bmstu.ru

*Prior experimental investigations of a simplest power actuator made of nickel-titanium alloy with a shape memory effect were carried out. On the base of these investigations the deformation and force characteristics of the alloy were studied and the conditions of the alloy temperature-strength preparation increasing deformation characteristics were defined.*

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

Создание крупногабаритных космических конструкций сопряжено с решением ряда технических и механических проблем, обусловленных уникальностью объектов, характерной особенностью которых является сочетание противоречивых требований увеличения геометрических размеров и обеспечения достаточной жесткости при весьма ограниченной массе материала силового каркаса [1]. Особый класс крупногабаритных космических конструкций образуют трансформируемые конструкции, т. е. конструкции, имеющие разные конфигурации в транспортном положении и в рабочем состоянии на орбите [2]. Конструктивная схема трансформируемой конструкции содержит в себе большое число элементов, соединенных шарнирными узлами, имеющими в своем составе замковые устройства, жестко фиксирующие рабочую форму трансформируемой системы. Процесс раскрытия конструкции происходит под воздействием силовых факторов, в качестве которых могут быть использованы сжатые или растянутые пружины, электродвигатели и т. д.

Существуют материалы с особыми физико-механическими характеристиками, являющиеся группой функциональных материалов. Представителем

функциональных материалов является группа сплавов с термоупругими мартенситными превращениями и термомеханической памятью – материалы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ). Перспективным направлением прикладных исследований в области применения материалов с ЭПФ является создание на их основе силовых термомеханических приводов для трансформируемых крупногабаритных космических конструкций [3]. Существует три вида силовых приводов на основе материалов с ЭПФ. Первый вид называется одноразовым прямого действия: они «работают» однократно. Второй вид называется силовым приводом с последствием, в модели которого для создания усилия используется пружина. Третий вид называется дифференциальным, в нем используется элемент с ЭПФ (вместо пружины), предназначенный для создания активной задерживаемой силы и деформирования, и элемент с ЭПФ – для «хранения» в нем некоторой первоначальной энергии [4; 5].

В настоящее время предложены разнообразные модели, описывающие кинетику мартенситных превращений, закономерности накопления и возврата деформаций при различных режимах термосилового воздействия на материалы с ЭПФ. Однако математи-

ческие сложности описания поведения материалов с ЭПФ, необходимость использования в математических моделях большого количества фактических экспериментальных данных не позволили пока разработать инженерные методики расчета и конструирования силовых приводов из материалов с ЭПФ. При конструировании приводов на основе материалов с ЭПФ основную роль играют сегодня экспериментальные методы.

В предлагаемом простейшем приводе применен проволочный элемент (проволока диаметром 1,5 мм), изготовленный из сплава никелида титана (ТН-1), и нагреваемый в процессе работы путем пропускания через него электрического тока. В процессе предварительных испытаний проволочные элементы подвергались различным видам температурной обработки. Затем они растягивались до относительного удлинения порядка 4...7 % и в этом состоянии фиксировались. При пропускании электрического тока силой 6...10 А по проволочным элементам они нагревались до температуры обратных мартенситных превращений, при которой восстанавливали свою первоначальную форму (длину), при этом в элементах развивалось продольное усилие (усилие восстановления). Испытания подтвердили принципиальную возможность создания привода раскрытия с использованием материала с ЭПФ. Был изготовлен трехсекционный макет трансформируемой конструкции. Испытания макета также показали возможность использования одного привода для раскрытия многосекционной конструкции. В дальнейших исследованиях предполагается создание макета реальной трансформируемой конструкции для проведения полного цикла экспериментальных исследований по её раскрытию и принятию рабочей формы.

#### Библиографические ссылки

1. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Часть 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 51–57.

2. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов и др. М. : Изд-во «Факториал», 1997. 302 с.

3. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky et al. // Proceedings of the First Interenational Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA, 1994. P. 245–248.

4. Liang C., & Rogers C. A. Design of shape memory alloy actuators // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1997. № 8(4). P. 303–313.

5. Position control of a robot finger with variable stiffness actuated by shape memory alloy / J. Li, G. Zhong, H. Yin et al. // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. P. 4941–4946.

#### References

1. Lopatin A. V., & Rutkovskaya M. A. The review of designs of modern transformed space antennas // *Vestnik SibGAU*. 2007. № (2). P. 51–57.

2. Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruktсий [Mechanics of large space structures] / N. V. Banichuk, I. I. Karpov, D. M. Klimov et al. Moscow : Faktorial Publ., 1997. 302 p.

3. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky et al. // Proceedings of the First Interenational Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA, 1994. P. 245–248.

4. Liang C., & Rogers C. A. Design of shape memory alloy actuators // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1997. № 8(4). P. 303–313.

5. Position control of a robot finger with variable stiffness actuated by shape memory alloy / J. Li, G. Zhong, H. Yin et al. // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. P. 4941–4946.

© Зарубин В. С., Зимин В. Н., Колосков И. М., Павлов Н. Г., Филиппов В. С., 2019



УДК 629.78.064.56

## РАЗРАБОТКА МЕХАНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА БАТАРЕИ СОЛНЕЧНОЙ ДЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. А. Зоммер, А. В. Иванов, А. П. Кравчуновский, П. А. Орлин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: semen\_zommer@mail.ru

*Представлены результаты разработки механического устройства батареи солнечной мощностью более 12 кВт для высокоэнергетических платформ космических аппаратов.*

*Ключевые слова: механическое устройство, батарея солнечная, космический аппарат.*

## DESIGNING A MECHANICAL DEVICE OF SOLAR BATTERY FOR HIGH-ENERGY SPACECRAFT PLATFORMS

S. A. Zommer, A. V. Ivanov, A. P. Kravchunovsky, P. A. Orlin

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: semen\_zommer@mail.ru

*The paper presents the results of designing a mechanical device of solar battery with a power of more than 12 kW for high-energy spacecraft platforms.*

*Keywords: mechanical device, solar battery, spacecraft platform.*

Механические устройства батареи солнечной входят в состав большинства космических аппаратов и решают такие задачи, как [1; 2]:

- размещение и монтаж фотопреобразователей (ФП) на панелях батареи солнечной;
- закрепление батареи солнечной на корпусе космического аппарата;
- трансформация панелей батареи солнечной в рабочее положение.

Использование более энергоёмких компонентов модуля полезной нагрузки и модуля служебных систем ставит перед системой электроснабжения спутника задачу обеспечения повышенной мощности, требуемой для функционирования космического аппарата [3; 4].

Целью работы является разработка механического устройства батареи солнечной (МУ БС), позволяющего формировать в рабочем положении площадь до 70 м<sup>2</sup> для одного крыла БС.

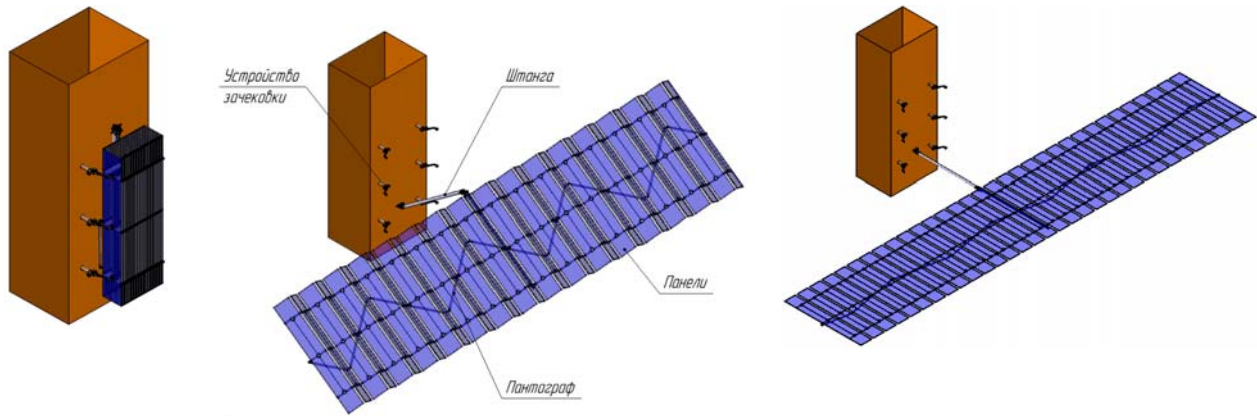
В работе решаются следующие задачи: анализ существующих конструкций МУ БС, способных обеспечить требуемую площадь в раскрытом положении, определение возможности их использования в составе платформ космических аппаратов разрабатываемых в АО «ИСС», разработка конструктивно-компоновочной схемы нового МУ БС, позволяющего упаковывать большее количество панелей БС в зоне размещения спутника под обтекателем ракеты-носителя, способного в раскрытом положении обеспечивать требуемую рабочую площадь для размещения ФП.

В результате проведенного анализа существующих на данный момент отечественных и зарубежных разработок (патенты: RU № 2619158, RU № 2485026, RU № 2460676, RU № 2214949, RU 2309093, SU 1758988 A1, SU 1815925, RU 1713221 C, RU 2053940 C1, RU 2200115, RU 2632677, RU № 2200115, RU № 2309093, RU № 2504129, RU 2574057, RU 2144890, WO 99/07017) выявлены основные преимущества и недостатки типовых конструкций крупногабаритных МУ БС.

Исходя из недостатков существующих конструкций крупногабаритных МУ БС, разработана конструктивно-компоновочная схема МУ БС, обеспечивающая раскрытие солнечной батареи мощностью более 12 киловатт, отвечающая требованию применимости в составе высокоэнергетических платформ производства АО «ИСС».

Конструктивно разработанное механическое устройство состоит:

- из пакета панелей батареи солнечной (см. рисунок);
- штанги (см. рисунок);
- механического устройства фиксации на корпусе КА (замки зачеховки) (см. рисунок);
- механического устройства раскрытия (шарнирные узлы (ШУ) штанги, электромеханический привод (ЭМП), ШУ панелей батареи солнечной, система синхронизации, пантограф, ШУ пантографа (см. рисунок).



Общий вид механического устройства батареи солнечной и логика его функционирования

Штанга, пантограф и панели соединены между собой по средствам ШУ. ШУ штанги соединены между собой системой синхронизации. В состав промежуточного ШУ штанги дополнительно входит ЭМП, раскрывающий МУ БС с заданной скоростью за счет системы синхронизации. Раскрытие пакета панелей происходит за счет раскрытия звеньев пантографа.

В транспортировочном положении МУ БС удерживается замками зачековки, в раскрытом удерживается остаточными моментами пружинных приводов ШУ пантографа и крючками зачековки установленных в соответствующих ШУ пантографа.

Во время раскрытия крыла БС, после срабатывания замков зачековки и освобождения конструкции из зафиксированного состояния, под действием упругих сил пружинных приводов шарнирных узлов происходит раскрытие штанги. Так как раскрытие всей конструкции производится синхронно, на центральное корневое звено пантографа, кинематически и механически связанное со штангой МУ БС, передается вращательный момент. После передачи вращения на центральное звено, пантограф начинает синхронно раскрывать пакет панелей БС.

При использовании данной кинематической схемы, для раскрытия панелей необходимо вращение только одного элемента – центрального звена пантографа, что позволяет раскрывать весь механизм с помощью одного привода. Также данная кинематическая схема может работать как на раскрытие, так и на последующее складывание, вращая центральное звено пантографа в обратное направление.

Используя спроектированную модель проведен механический анализ и подтверждено соответствие полученных характеристик разработанной МУ БС к требуемым для аналогичных крупногабаритных МУ БС.

В ходе проектирования конструкции МУ БС использовались унифицированные механические узлы и конструктивные решения применяемые в настоящее время в производстве МУ БС выпускаемых в АО «ИСС». Таким образом, при необходимости изготовления разработанного крыла

БС возможно использование уже существующей производственной базы предприятия, что позволяет сократить время и стоимость изготовления.

В результате выполнения работы разработана конструктивно-компоновочная схема механического устройства батареи солнечной, обеспечивающего раскрытие солнечной батареи мощностью более 25 киловатт для двух крыльев БС.

Разработанное МУ БС решает недостатки существующих конструкций крупногабаритных МУ БС и может применяться в составе высокоэнергетических платформ космических аппаратов производства АО «ИСС», при этом схема упаковки панелей позволяет максимально использовать зону размещения МУ БС под обтекателем ракеты носителя.

#### Библиографические ссылки

1. Шатров А. К., Назаров Л. Н., Машуков А. В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 144 с.
2. Гушин В. Н. Основы устройства космического аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2003. 272 с.
3. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
4. Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security. Phase of Architecture Feasibility Study.// Report to the Director National Security Space Office. 10 October 2007. 137 p.
5. Critical Technologies for Space Settlement – Space Studies Institute, October 29–31, 2010. P. 1–10.

#### References

1. Shatrov A. K., Nazarova L. P., Mashukov A. V. Osnovy konstruirovaniya mekhanicheskikh ustroystv kosmicheskikh apparatov. Konstruktivnye resheniya, dinamicheskie kharakteristiki. [Bases of designing of mechanical devices of spacecrafts. Constructive decisions, dynamic characteristics]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2009. 144 p.

2. Guschin V. N. Osnovy ustroystva kosmicheskogo apparatov : uchebnik dlya vuzov (Bases of the device space devices: the textbook for higher education institutions). Moscow : Mashinostroyeniye, 2003. 272 p.

3. Tchebotarev V. E., Kosenko V. Ye. Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya : ucheb. Posobiye (Design of spacecrafts of information support) / Sib. gos. un-t. Krasnoyarsk, 2011, 488 p.

4. Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security. Phase of Architecture Feasibility Study.// Report to the Director National Security Space Office. 10 October 2007. 137 p.

5. Critical Technologies for Space Settlement – Space Studies Institute, October 29–31, 2010. P. 1–10.

© Зоммер С. А., Иванов А. В.,  
Кравчуновский А. П., Орлин П. А., 2019

УДК 629

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УКЛАДКИ ТЕПЛОВЫХ ЭКРАНОВ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН»

А. В. Иванов, А. Н. Тимофеев, С. А. Зоммер

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: 2481ghj@mail.ru

*Представлена система укладки тепловых экранов, которая может быть взята за основу в разрабатываемой пассивной системе охлаждения космического телескопа «Миллиметрон».*

*Ключевые слова: «Миллиметрон», космический телескоп, система охлаждения, тепловые экраны, система укладки.*

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR LAYING THERMAL SCREENS OF THE SPACE TELESCOPE "MILLIMETRON"

A. V. Ivanov, A. N. Timofeev, S. A. Zommer

Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: 2481ghj@mail.ru

*The article presents a system for laying thermal screens, which can be taken as a basis in the developed passive cooling system of the space telescope "Millimetron".*

*Keywords: "Millimetron", space telescope, cooling system, thermal screens, laying system.*

Одной из систем обеспечивающей заданный тепловой режим рефлектора космического телескопа является система пассивного охлаждения, представляющая собой набор пленочных экранов, изготовленных из металлизированной полиимидной пленки. На рис. 1 показаны тепловые экраны космического телескопа «Миллиметрон».

Система укладки предназначена для упорядоченного размещения пленочных экранов между элементами конструкции тепловых экранов.

Исходя из задач, можно сформулировать следующие основные требования назначения системы укладки:

– обеспечение упорядоченной укладки тепловых экранов в стартовом положении с целью исключения

повреждений экранов, таких как перегибы, заломы, порывы и т. д.;

– обеспечение удержания тепловых экранов в стартовой конфигурации на этапах НЭО, транспортировки и выведения на орбиту с исключением повреждений экранов;

– обеспечение упорядоченного развертывания тепловых экранов из стартового положения в рабочее.

Основная идея разработанной системы укладки заключается в том, что тепловые экраны послойно укладываются в зоне между спицами. Для организации удержания и упорядоченного раскрытия пленочных экранов, предполагается над спицей установить стержни, к которым на кольцах подвешиваются уложенные пленочные экраны.

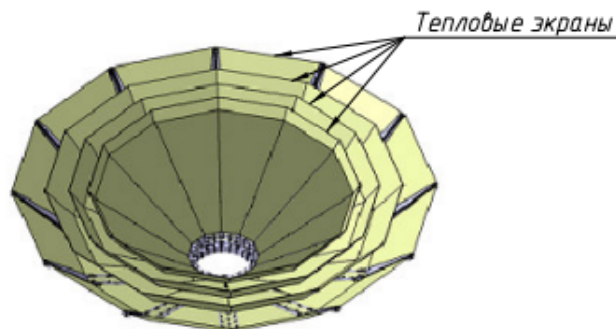


Рис. 1. Система пассивного охлаждения космического телескопа «Миллиметрон»

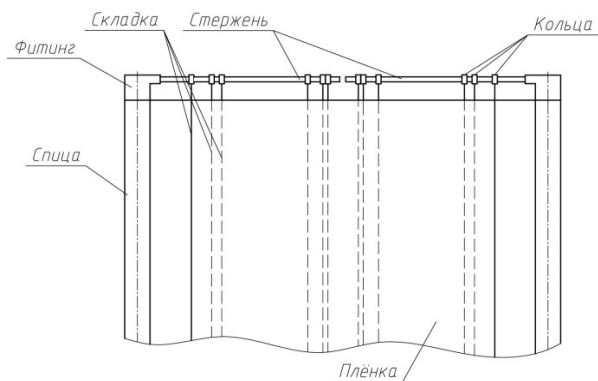


Рис. 2. Схема укладки тепловых экранов

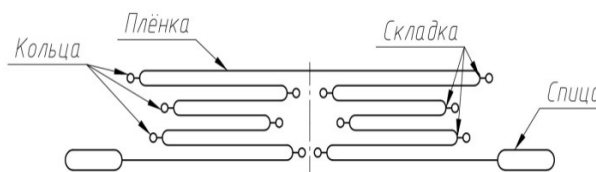


Рис. 3. Схема образования складок

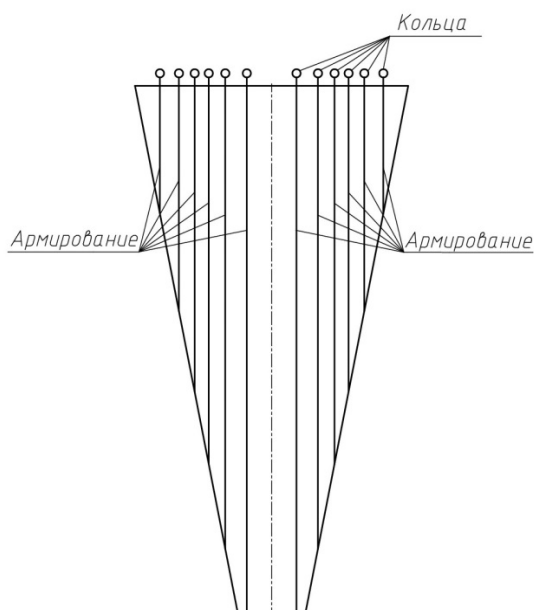


Рис. 4. Схема армирования пленки



Рис. 5. Макет системы укладки тепловых экранов

Схема укладки тепловых экранов представлена на рис. 2.

Схема образования упорядоченных складок, представлена на рис. 3.

Складки образуются в местах, где на пленке предварительно производилось армирование, изображенное на рис. 4. Для отработки спроектированной системы укладки тепловых экранов был разработан макет сектора системы раскрытия тепловых экранов в масштабе 1:5, представленный на рис. 5.

Разработанная система укладки обеспечивает выполнение всех вышеперечисленных требований и обеспечивает развертывание слоев экрана без создания зацеплений в процессе раскрытия.

### Библиографические ссылки

1. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции / Г. Г. Райкунов, В. А. Комков, В. М. Мельников, Б. Н. Харлов. 2009. 447 с.
2. Лаптев Е. А. Система развертывания солнцезащитных экранов. 2013.

### References

1. Centrifugal frameless large space structures / G. G. Raykunov, V. A. Komkov, V. M. Melnikov, B. N. Harlov. 2009. 447 p.
2. Laptev E. A. Sunscreen deployment system. 2013.

© Иванов А. В., Тимофеев А. Н., Зоммер С. А., 2019

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КЛЕЕВОГО ШВА П-ОБРАЗНОГО ФИТИНГА

Е. А. Иванов

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Rak-kor-95@mail.ru

*Рассматривается напряженное состояние клеевого шва П-образного фитинга. Применение П-образного фитинга позволит создавать универсальные узлы крепления на сотовой панели.*

*Ключевые слова: П-образный фитинг, боковой элемент, клеевое соединение, сотовая панель, узел крепления.*

## STATE OF STRESS GLUE LINE P-GRAPHIC FITTING

E. A. Ivanov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Rak-kor-95@mail.ru

*Consider state of stress glue line P-graphic fitting. Application P-graphic fitting let to make the universal node fixing on honeycombed.*

*Keywords: P-graphic fitting, honeycombed, collateral element, glue line, node of fixing.*

При создании современных негерметичных КА широко применяются сотовые конструкции. В связи с этим существует задача оптимизаций сотовых конструкций с точки зрения массы, прочности узлов соединения сотовых панелей между собой, креплений сосредоточенных масс и унификаций панелей при их проектировании.

Одним из узлов соединения сотовых панелей между собой является элемент в виде наружного П-образного фитинга, который прикрепляется на сотовую панель путем склеивания.

Склеиванием называют технологический процесс получения неразъемного соединения путем адгезионного взаимодействия клея и подложек (склеиваемой поверхности) [1]. Такая технология используется для всех материалов подложек, независимо от их физической природы.

Благодаря склеиванию, П-образный фитинг может монтироваться на любом участке панели. Материал изготовления кронштейна может быть любым, так же как его размер и форма, что делает П-образный фитинг универсальным узлом соединения.

Неразъемное клеевое соединение создается при помощи образования клеевой прослойки (промежуточный слой), между которой и соединяемым материалом сохраняется граница раздела [2].

Прочность такого соединения обусловлена адгезионным взаимодействием соединяемых поверхностей с клеевой прослойкой, когезионной прочностью этой прослойки и соединяемого материала, конструкцией клеевого шва [2]. Его качество зависит от ряда факторов, многие из которых являются взаимоисключающими или одновременно изменяющимися несколько характеристик соединения (структура и полярность

макромолекул клея и подложки, реологические свойства, донорно-акцепторное взаимодействие, свободная поверхностная энергия и т. д.) [2].

Для практического применения клеевого соединения, в случаях отсутствия глубоких лабораторных исследований, достаточно знать основные свойства клеевого материала ( $E_{1, \text{род}}$ ,  $E_{2, \text{род}}$ ,  $\mu$ , вязкость, смачивающая способность и т. д.) и процессы, проходящие в нем.

Рядом исследований было установлено, что величина модуля упругости первого рода затвердевшего клеевого слоя напрямую зависит от толщины [3].

С уменьшением толщины слоя заметно возрастает жесткость в направлении действия приложенного растягивающего усилия. Это вызывается тем, что сужение клеевого шва в поперечном направлении затруднено из-за повышения жесткости [4].

Наилучшие прочностные характеристики неразъемного клеевого соединения проявляются при напряжении сдвига [5]. Это обусловлено упругими свойствами клея, перераспределением напряжения в клеевом слое, и как следствие сглаживание местных пиков касательных напряжения.

В случае нормальных напряжений (отрыв, неравномерный отрыв), его упругие свойства не как не влияют на несущую способность вследствие хрупкости [4].

В качестве подтверждения проанализируем данные испытаний клеевого соединения П-образного фитинга на сотовую панель (рис. 1, 2).

В данном случае, клеевая прослойка, из эпоксидной смолы, будет испытывать сложное напряженное состояние, сдвиг ( $\tau_{\text{сдв}}$ ) и кручение ( $\tau_{\text{кр}}$ ), как показано на схеме (рис. 3).

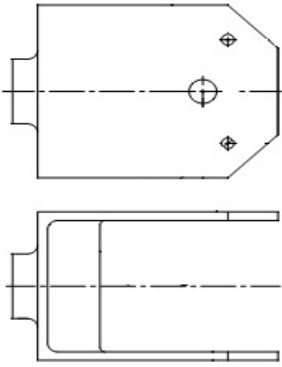


Рис. 1. П-образный фитинг

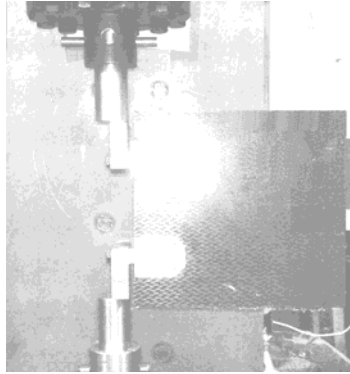


Рис. 2. Установка образца для испытаний

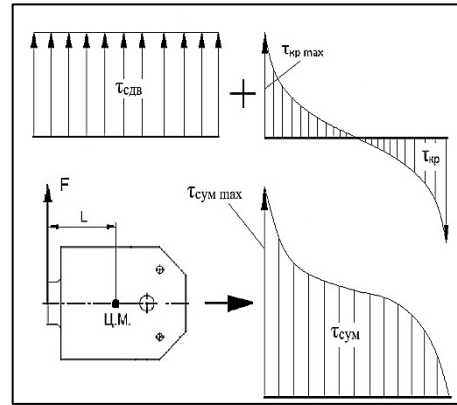


Рис. 3. Сложное напряженное состояние клеевого шва

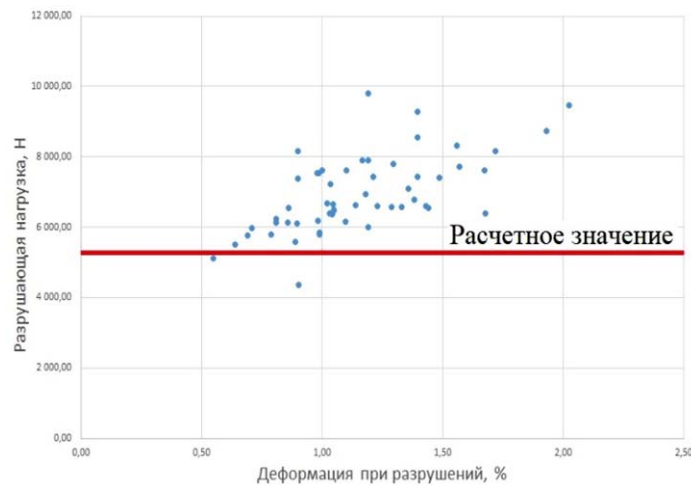


Рис. 4. График испытаний деформация – разрушение

Наибольшее касательное напряжение образуется при суммировании напряжения сдвига и кручения [6]:

$$\tau_{\text{сум}} = \tau_{\text{сдв}} + \tau_{\text{кр. max}} = \frac{F}{S} + \frac{M}{W_k} = \frac{F}{S} + \frac{F \cdot L}{W_k} = \frac{F \cdot (W_k + L \cdot S)}{S \cdot W_k},$$

Откуда

$$F = 2 \cdot \left( \frac{\tau \cdot S \cdot W_k}{W_k + L \cdot S} \right).$$

где  $F$  – критическая сила;  $M$  – крутящий момент;  $W_k$  – момент сопротивления сечения приклеиваемой площади П-образного фитинга (одной стороны);  $S$  – площадь клеевого соединения (одной стороны);  $L$  – плечо крутящего момента;  $\tau$  – допустимое напряжение сдвига.

При расчете по этой формуле, несущая способность П-образного фитинга на сдвиг равна 5213 Н. Сравним данные испытаний с расчетным значением (рис. 4).

Как видно из данных, значение испытательной разрушающей нагрузки выше расчетной, так как бла-

годаря упругому перераспределению, пик касательных напряжений от крутящей силы сглаживается, и  $\tau_{\text{сум. max}}$  достигается при более высоких значениях силы  $F$  [3].

Таким образом, при сложном напряженном состоянии, клеевое соединение П-образного фитинга проявляет себя наилучшим образом и может быть рекомендовано для применения его в качестве узла соединения сотовых конструкций между собой.

#### Библиографические ссылки

1. Вильнав Ж. Ж. Клеевые соединения. М. : Техносфера, 2007. 384 с.
2. Комаров Г. В. Способы соединения деталей из пластических масс. М. : Химия, 1979. 288 с.
3. Кейгл Ч. Клеевые соединения. М. : Мир, 1971. 296 с.
4. Хертель. Г. Тонкостенные конструкций. М. : Машиностроение, 1965. 528 с.
5. Ратьковский В. С. Применение клеев при производстве электромонтажных работ. М. : Энергия, 1978. 64 с.

6. Беляев Н. М. Сопротивлением материалов. М. : Наука, 1976. 608 с.

#### References

1. Villenave J. J. *Kleevoe soedinenie* [Adhesive bonding]. Moscow : Tekhnosfera Publ., 2007. 288 p.

2. Komarov G. V. *Sposoby soedineniya detalej iz plasticheskikh mass* [Method jointing details of plastics mixture]. Moscow : Himiya Publ., 1979. 288 p.

3. Cagle. Ch. *Kleevoe soedinenie* [Adhesive bonding]. Moscow : Mir Publ., 1971. 296 p.

4. Hertel. G. *Tonkostennye konstrukcij* [beamless plate structure]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1965. 528 p.

5. Rat'kovskij V. S. *Primenenie kleev pri proizvodstve elektromontazhnyh rabot* [Use glue in electrical mounting's work]. Moscow : Energiya Publ., 1978. 64 p.

6. Belyaev N. M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow : Nauka Publ., 1976. 608 p.

© Иванов Е. А., 2019



**КРУПНОГАБАРИТНАЯ АНТЕННА S-ДИАПАЗОНА ДЛЯ СПУТНИКА СВЯЗИ**

Л. А. Кожевникова

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
 Российская Федерация, 662972, г. Железнодорож Красноярского края, ул. Ленина, 52  
 Сибирский федеральный университет  
 Российская Федерация, 662971, г. Железнодорож Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
 E-mail: larisa036@rambler.ru

*Рассматриваются вопросы проектирования по рефлектору с большой апертурой и его интеграцией на спутнике.*

*Ключевые слова: крупногабаритная конструкция, антенна, рефлектор, спутник.*

**OVERSIZED S-BAND ANTENNA FOR COMMUNICATIONS SATELLITE**

L. A. Kozhevnikova

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
 52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
 Siberian Federal University  
 12a, Kirova Str., Zheleznogorsk Krasnoyarsk region Russia, 662971, Russian Federation  
 E-mail: larisa036@rambler.ru

*The problems of designing a reflector with a large aperture and its integration on the satellite are considered.*

*Keywords: large-size design, antenna, reflector, satellite.*

**Введение.** Для связи спутниковой системы с наибольшим наземным терминалом типа ручного или автомобильного устройства требуется высокая плотность потока мощности на землю для обеспечения высококачественной радиосвязи. Для спутников, которые работают в S-диапазоне, требуется антенна с большой апертурой.

Предметом данной статьи является антенна с большой апертурой. Параболоидный рефлектор с проектируемой апертурой диаметром 12 м Astromesh™ используется на спутнике для достижения высокой направленности луча по требуемым зонам обслуживания. Данная конструкция намного больше, чем спутник и необходимо сложить данную раскладную конструкцию в относительно малый объем с тем, чтобы уместить под обтекателем РН.

### **1. Системным решением является корректный подход.**

Эта задача проектирования многофасетной конструкции. Конструкторские и электрические проектные решения были согласованы в следующих специфических областях:

Рефлектор должен быть сложен в малом объеме при выведении.

Сложенный рефлектор смещен от центра масс спутника и не должен вызывать проблем в условиях повышенной вибрации.

Механизмы, которые раскрывают рефлектор на орбите, должны быть ультранадежными, и обеспечить

аккуратное позиционирование рефлекторной поверхности.

После раскрытия влияние крупногабаритной конструкции на систему управления спутником должна быть минимальной.

В общем, оптимальное решение для любой области этих проектных проблем не будет оптимальным для других областей. Это требует системного подхода, в котором решение для каждой проектной проблемы имеет приемлемое влияние на другие области, требующие внимания.

### **2. Геометрия рефлектора и конструкция облучателя.**

#### **3. Конструкция рефлекторной антенны.**

Системный подход требовал рефлекторной сборки, способной работать при следующих требованиях:

СКЗ точности	< 2.54 мм
Точность наведения (const + внешние условия)	< 0.085°
Масса (в т. ч. Стартовую опорную конструкцию и штангу)	< 110 кг
Частота в сложенном положении	> 30 Гц
Частота в раскрытом положении	> 0.37 Гц

#### **4. Конструкция рефлектора.**

Рефлектор Astromesh™ включает в себя проектируемую круговую апертуру диаметром 12 м, формируемую параболической сетчатой поверхностью, подвешенной на периметрической ферменной системе.

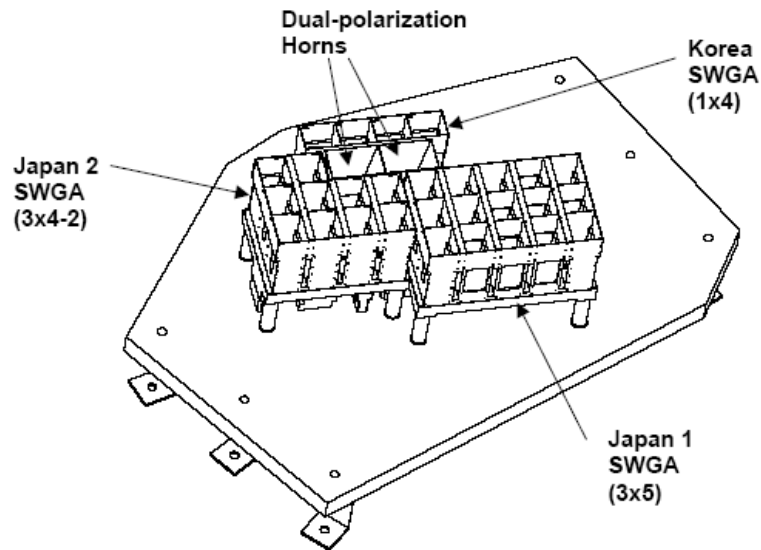


Рис. 1. Многолучевая решетка

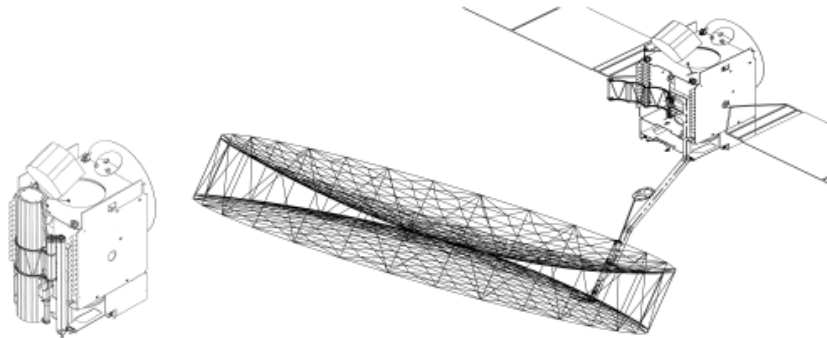


Рис. 2. Положения рефлектора и спутника в сложенной и раскрытой конфигурации

### Библиографические ссылки

1. Каталог разработок. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rusnanonet.ru/products/21131/> (дата обращения: 04.09.2019).
2. Руденко Б. О. О чем пишут научно-популярные журналы мира // Наука и жизнь. 2008. № 11. С. 111–112.
3. Новости технологии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techcult.ru/tag/satellite> (дата обращения: 04.09.2019).
4. Новые технологии в космонавтике [Электронный ресурс]. URL: <http://newnano.ru/nanotehnologii-kak-nauka/nanotehnologii-v-kosmonavtike/> (дата обращения: 04.09.2019).
5. Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 7 (12). С. 110–119.

### References

1. The catalogue of developments [Electronic resource]. URL: <http://www.rusnanonet.ru/products/21131/> (access: 04.09.2019).
2. Rudenko B. O. *What I write popular science journals of the world // Science and life*. 2008. № 11. P. 111–112.
3. Technology news [Electronic resource]. URL: <https://www.techcult.ru/tag/satellite> (access: 04.09.2019).
4. New technology in space [Electronic resource]. URL: <http://newnano.ru/nanotehnologii-kak-nauka/nanotehnologii-v-kosmonavtike/> (access: 04.09.2019).
5. Ponomarev S. V. The transformed reflectors of antennas of spacecrafts // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika I mekhanika*. 2011. № 7 (12). P. 110–119.

© Кожевникова Л. А., 2019

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УГЛЕРОДНЫХ ТКАНЕЙ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К. В. Копылов<sup>1</sup>, А. Н. Овчинников<sup>1</sup>, В. Д. Ворончихин<sup>1</sup>, Т. А. Шалыгина<sup>1,2</sup>, С. Ю. Воронина<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. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50  
E-mail: himik18096@gmail.com

*Проведен сравнительный анализ углеродных тканей различной структуры.*

*Ключевые слова: углеродная ткань, аппрет.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF CARBON FABRICS CONSTRUCTIONAL PURPOSES

K. V. Kopylov<sup>1</sup>, A. N. Ovchinnikov<sup>1</sup>, V. D. Voronchikhin<sup>1</sup>, T. A. Shalygina<sup>1,2</sup>, S. Yu. Voronina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>FRC “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036. Russian Federation  
E-mail: himik18096@gmail.com

*Comparative analysis of apprets in carbon fabrics of various kinds is carried out.*

*Keywords: carbon fabrics, appret.*

Применение углеродных тканей в качестве армирующего слоя при изготовлении полимерных композиционных материалов обусловлено их высокой прочностью, термоустойчивостью и стойкостью к длительному воздействию агрессивных сред. Углеродные волокна, образующие углеродные ткани, относятся к переходным формам углерода, структурные элементы которого близки к графиту [1]. В зависимости от режима термообработки исходных полимерных волокон получаемые углеродные волокна подразделяются на карбонизованные и графитизированные [2].

Предполагается, что любое волокно, дающее высокий выход коксового остатка, можно рассматривать как потенциальный материал для получения углеродного волокна [3]. Как следствие, основным сырьем для получения углеродных волокон являются целлюлозные, полиакрилонитрильные, пековые и поливинилспиртовые волокна.

В процессе создания волокон для технических тканей используются аппреты, защищающие волокна

от внешних механических воздействия в межоперационный период и повышающие адгезионное взаимодействие с полимерной матрицей. Как правило, для аппретирования применяют водно-эмульсионные системы, наносимые смачиванием, путем электролиза или электрофореза.

Наибольший эффект дает сочетание поверхностей обработки (активации) с последующим нанесением аппрета. Количество аппретирующего вещества составляет от 0,5 до 4 % [1].

В настоящее время в промышленности применяется широкий спектр углеродных тканей различной структуры [4–9], различающихся по типу текстильной обработки, углом переплетения нитей, толщиной используемых нитей и иными характеристиками (рис. 1).

Сравнение базовых характеристик углеродных тканей конструкционного назначения, представленное в таблице, позволяет детализировать область их применения.



*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 1. Структура углеродных тканей А-160 (*a*), саржи (*б*), арамидной (*в*) и гибридной (*г*)

Сравнительная характеристика углеродных тканей конструкционного назначения

Показатель	Марка ткани						
	Полотно 1250	A-80	A-160	T-1000	Саржа	Гибридная	Арамидная
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	200	81	156	2003	797	–	–
Плотность по основе, нитей / 10 см	50	–	–	50	25	66	53
Плотность по утку, нитей / 10 см	50	–	–	50	24	69	48
Усилие, разрушающее структуру ткани, кН	0,68	0,88	1,31	0,71	1,20	0,71	1,00

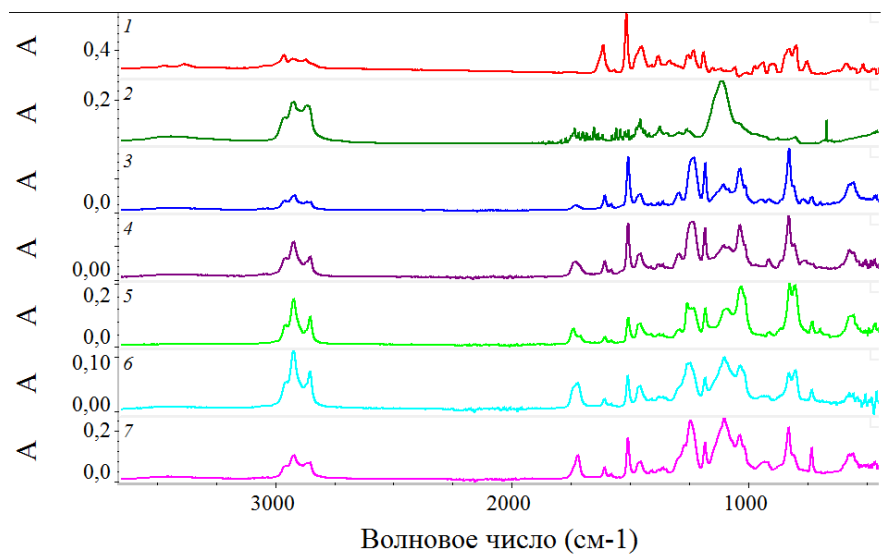


Рис. 2. Спектры аппретов, снятые с исследуемых тканей

Полученные ИК-спектрометре Thermo Scientific Nicolet iS10 (США) спектры экстрактов основных типов углеродных тканей конструкционного назначения (рис. 2) позволили определить тип применяемого аппрета.

Полученная информация о типе аппрета использована для расчета термодинамической совместимости с полимерной матрицей.

#### Библиографические ссылки

1. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М. : САЙНС-ПРЕСС, 2007. 192 с.
2. Углеродные волокна : пер. с яп. / С. Симамура, А. Синдо, К. Коцука и др. М.: Мир, 1987. 304 с.
3. Essentials of Carbon-Carbon Composites / Ed. C. R. Thomas, Royal Soc. of Chemistry, Cambridge. 1993. P. 9, 11, 12.
4. Каталог углеродных тканей [Электронный ресурс] // Композит – Холдинговая Компания. URL: <http://www.hccomposite.com/catalog/34/1974.html> (дата обращения: 15.08.2019).

5. Saati [Электронный ресурс] : cross-innovate. URL: <http://www.saati.com/en/markets/protection> (дата обращения: 15.08.2019).

6. Каталог углеродных тканей [Электронный ресурс] // Carbocarbo – композитный супермаркет. URL: [https://carbocarbo.ru/shop/product/uglearamidnyu\\_gibrid\\_3k\\_1000\\_165/](https://carbocarbo.ru/shop/product/uglearamidnyu_gibrid_3k_1000_165/) (дата обращения: 15.08.2019).

7. Каталог материалов [Электронный ресурс] // CarbonStudio – Композиционные материалы. URL: <https://carbonstudio.ru/item/style282-175g>. (дата обращения: 15.08.2019).

8. Продукция [Электронный ресурс] // Аспро – Углеродные ткани. URL: <http://www.asprotec.ru/product/> (дата обращения: 15.08.2019).

9. Опыт применения [Электронный ресурс] // Аспро – Углеродные ткани. URL: <http://www.asprotec.ru/examples/> (дата обращения: 15.08.2019).

#### References

1. Meleshko A. I., Polovnikov S.P. Uglyerod, uglyerodnye volokna, uglyerodnye kompozity. Moscow : SAJNS-PRESS, 2007. 192 p.

2. Uglernodnye volokna : per. s yapon. / S. Simamura, A. Sindo, K. Kocuka et al. Moscow : Mir, 1987. 304 p.
3. Essentials of Carbon-Carbon Composites / Ed. C. R. Thomas, Royal Soc. of Chemistry, Cambridge, 1993. P. 9, 11, 12.
4. Composite-Holding Company [Electronic resource]. URL: <http://www.hccomposite.com/catalog/34/1974.html>. (access: 15.08.2019).
5. Saati : cross-innovate [Electronic resource]. URL: <http://www.saati.com/en/markets/protection> (access: 15.08.2019).
6. Carbocarbo [Electronic resource]. URL: [https://carbocarbo.ru/shop/product/uglearamidnyy\\_gibrid\\_3k\\_1000\\_165/](https://carbocarbo.ru/shop/product/uglearamidnyy_gibrid_3k_1000_165/) (access: 15.08.2019).
7. CarbonStudio [Electronic resource]. URL: <https://carbonstudio.ru/item/style282-175g>. (access: 15.08.2019).
8. Aspro – Carbon fabrics [Electronic resource]. URL: <http://www.asprotec.ru/product/> (accessed 15.08.2019).
9. Aspro – Carbon fabrics [Electronic resource]. URL: <http://www.asprotec.ru/examples/> (access: 15.08.2019).

© Копылов К. В., Овчинников А. Н.,  
Ворончихин В. Д., Шалыгина Т. А.,  
Воронина С. Ю., 2019

УДК 629.78, 681.51

## РАЗРАБОТКА БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Л. Б. Кочин, С. А. Матвеев, А. И. Тишков, А. Д. Ширшов, Н. Г. Яковенко

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1  
E-mail: shaldmi@inbox.ru

*В настоящее время антенны космического базирования, основанные на крупногабаритных трансформируемых конструкциях, являются одним из наиболее перспективных направлений развития информационных спутниковых систем. Создание системы управления и корректировки формы радиоотражающего сетеполотна антенны позволит существенно улучшить рабочие характеристики канала связи.*

*Ключевые слова: система управления, крупногабаритные космические трансформируемые антенны, исполнительные устройства, лазер, оптическая система, накопитель энергии, микроконтроллер.*

## DEVELOPMENT OF A WIRELESS CONTROL SYSTEM FOR LARGE-SIZED TRANSFORMABLE CONSTRUCTIONS

L. B. Kochin, S. A. Matveev, A. I. Tishkov, A. D. Shirshov, N. G. Yakovenko

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinova  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation  
E-mail: shaldmi@inbox.ru

*Currently, space-based antennas based on large-sized transformable structures are one of the most promising areas for the development of information satellite systems. Creating a control system and adjusting the shape of the radio-reflecting network antenna array will significantly improve the performance of the communication channel.*

*Keywords: control system, large space transformable antennas, actuators, laser, optical system, energy storage, microcontroller.*

После завершения раскрытия, точная геометрия радиоотражающего сетеполотна и системы вант неизвестна. С большой долей вероятности можно предполагать, что если процесс раскрытия завершился корректно, то сетеполотно и система вант заняли положение, близкое к заложенному при конструировании. Однако небезосновательными являются предположения о том, что сетеполотно может совершать колебания неизвестной амплитуды и частоты около положения равновесия, при этом коэффициент затухания таких колебаний весьма мал и рассеяния энергии практически не происходит.

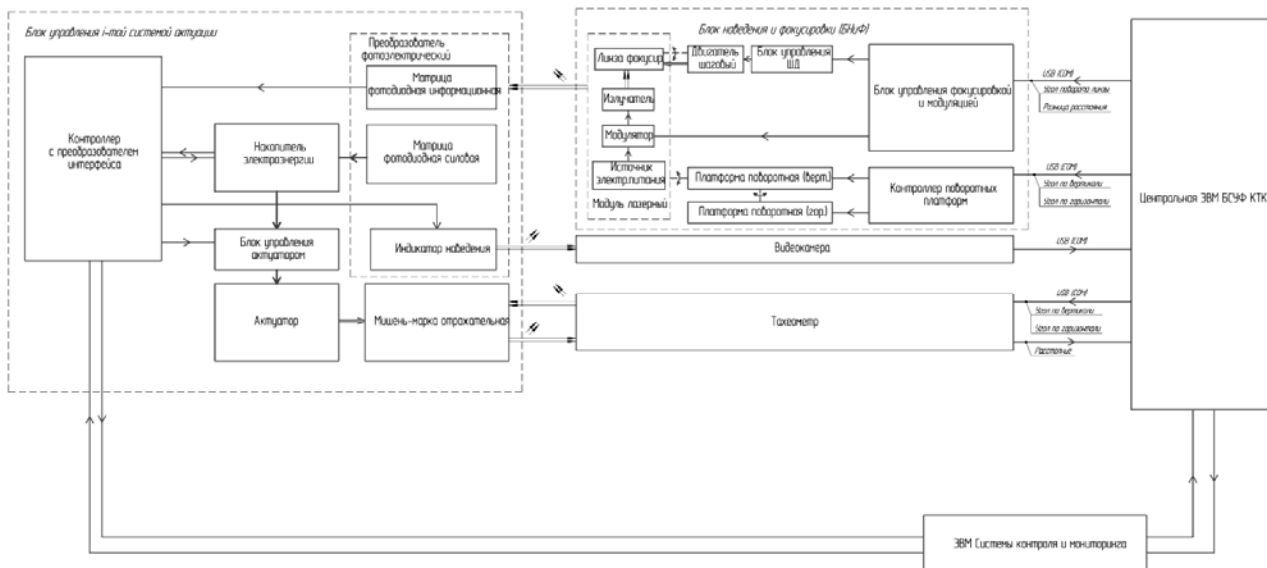
Разработка активной системы поддержания формы конструкции, при парировании основных возмущающих воздействий и/или ликвидации их последствий с минимальными энергозатратами является чрезвычайно актуальной задачей, поскольку ее успешное решение может привести к качественному улучшению рабочих характеристик рефлектора при передаче и приеме сигнала. Такая система предполагает распределенное размещение исполнительных электромеханических устройств, которые обеспечивают механические воздействия на ванты, фермы и сетеполотно. Однако каждое электромеханическое исполнительное устройство требует подведения ин-

формационного и энергетического кабелей, что в случае большого количества исполнительных электромеханических устройств приводит к необходимости прокладки большого количества кабелей. Такой подход влечет за собой радикальное увеличение массы всей системы и увеличивает вероятность запутывания конструкции при раскрытии. Другой подход представляет собой передачу энергии и информации беспроводным способом, а именно посредством направленного лазерного излучения по открытому оптическому каналу.

Структура беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых конструкций (БСУФ КТК) показана на рисунке.

Основными структурными элементами являются:

- лазер накачки, осуществляющий передачу энергии и информации до каждой системы актуации;
- лазерный трекер, измеряющий текущую форму сетеполотна;
- система актуации, точно корректирующая форму сетеполотна и включающая в себя фотопреобразователь, накопитель энергии, управляющий контроллер и исполнительное устройство;
- центральная ЭВМ, осуществляющая управление беспроводной системой управления формой.



Структура БСУФ КТК

Описанная структура позволяет создать малогабаритную и надежную беспроводную систему управления формой радиоотражающего сетеполотна крупногабаритной антенны космического базирования.

**Библиографические ссылки**

1. Передача энергии и информации по оптическому каналу для управления формой космической антенны / Л. Б. Кочин, М. А. Крылова, Д. А. Хромихин и др. // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2017. Т. 1. С. 129–130.
2. Matveev S. A., Shevtsov I. V., Shirshov A. D., Yakovenko N. G. Wireless Power Supply System for Flexible Space Antenna Actuators Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61, Issue 4. P. 636–641.
3. Крохин О. Н. К вопросу о возможности передачи энергии по оптическому каналу // Тез. докл. VIII междунар. науч. конф. по физике высоких плотностей энергии. Снежинск, 2005.
5. Boreysho A. S., Kochin L. B., Strakhov S. Yu. System for transmitting energy and information using laser radiation for control of the shape of large space-based antennas // 2016 International conference Laser Optics, LO 2016. St. Petersburg, 2016.

**References**

1. Peredacha energii i informacii po opticheskomu kanalu dlya upravleniya formoj kosmicheskoy anteny / L. B. Kochin, M. A. Krylova, D. A. Hromihin et al. // Reshetnevskie chteniya : materials of the Intern. scientific conf. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Sib. state aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2017. T. 1. P. 129–130.
2. Matveev S. A., Shevtsov I. V., Shirshov A. D., Yakovenko N. G. Wireless Power Supply System for Flexible Space Antenna Actuators Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61, Issue 4. P. 636–641.
3. Krokhin O. N. K voprosu o vozmozhnosti peredachi energii po opticheskomu kanalu [To the question of the possibility of transfer of energy through an optical channel] // Tez. dokl. VIII mezhdunarodnaya nauch. konferentsiya po fizike vysokikh plotnostey energii. Snezhinsk, 2005. RF.
5. Boreysho A. S., Kochin L. B., Strakhov S. Yu. System for transmitting energy and information using laser radiation for control of the shape of large space-based antennas // 2016 International conference Laser Optics, LO 2016. St. Petersburg, 2016.

© Кочин Л. Б. Матвеев, С. А., Тишков А. И., Ширшов А. Д., Яковенко Н. Г., 2019

УДК 629.78, 621.373.826

## СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ ПО ОТКРЫТОМУ ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

П. Е. Кошелев\*, А. Д. Ширшов, А. С. Толмачев, Е. И. Евстигнеева, Ю. В. Коноплев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, СПб, ул. 1-я Красноармейская, 1

\*E-mail: switchcompany@yandex.ru

*Разработка и применение систем наведения, фокусировки и передачи энергии и информации лазерного излучения является перспективным направлением в различных областях космической отрасли, в частности, в целях управления формой космических антенн.*

*Ключевые слова: система наведения, фотопреобразователь, модуляция лазерного луча, трансформируемая антенна космического базирования.*

## SYSTEM OF ENERGY AND INFORMATION TRANSFER VIA OPEN OPTICAL CHANNEL FOR SPACE ANTENNA SHAPE CONTROL

P. E. Koshelev\*, A. D. Shirshov, A. S. Tolmachev, E. I. Evstigneeva, Y. V. Konoplev.

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinova  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation

\*E-mail: switchcompany@yandex.ru

*Development and operation of systems of guidance, focusing and transfer of laser radiation energy and information is the advanced trend in various space industry fields, in space antennae shape control in particular.*

*Keywords: guidance system, photoconverter, modulation of the laser beam, transformable space antenna.*

В настоящее время совершенствование систем космической связи и дистанционного зондирования Земли является актуальной тематикой в космических разработках. Улучшение качества связи, помехоустойчивости и надежности подобных систем, создание новых технологий передачи данных с ИСЗ привели к разработке трансформируемых крупногабаритных космических антенн, поверхность которых способна изменять свою геометрическую форму в точках актуации (Геометрических узлах фронтальной сети, изменяющих свое пространственное положение посредством изменения рабочей длины стягивающих вант и, таким образом, выстраивающих форму радиотражающей поверхности рефлектора.) [1].

Одним из способов совершенствования КТК является переход на беспроводные системы передачи энергии. Подобный подход позволит заметно сократить конечную массу ИСЗ, а также минимизировать вероятность спутывания проводов при раскрытии ферменных конструкций. Разработка такого рода систем требует решение ряда задач, а именно:

- выбор метода беспроводной передачи энергии и информации, зависящий от данной системы;
- разработка системы направления энергии;
- организация системы преобразования передаваемой энергии и прием информации.

Для решения приведённых задач была изготовлена и испытана на работоспособность беспроводная система наведения, фокусировки и передачи энергии и информации, спроектированная в рамках выполнения разработки беспроводной системы управления фор-

мой крупногабаритной трансформируемой конструкции [2].

Беспроводная передача энергии осуществляется посредством направленного лазерного излучения. Подобный подход выбран исходя из перспективы применения системы в составе модулей космических аппаратов, и обладает рядом достоинств, среди которых основными являются низкие массогабаритные характеристики источника излучения, отсутствие радиочастотных помех, возможность передачи энергии на необходимые расстояния [3; 4].

Учитывая направленность лазерного излучения и необходимость передачи энергии на большие расстояния, требуется изготовить и отладить систему наведения лазерного излучения на точки актуации, расположенные на всей радиотражающей поверхности рефлектора. Система наведения реализована из двух прецизионных поворотных платформ, обеспечивающих возможность полного кругового поворота, объединенных в двухкоординатную систему. Для повышения КПД передачи энергии, необходимо фокусировать лазерное излучение в точке приема. Такая фокусировка может быть обеспечена оптической системой, состоящей из прецизионного линейного транслятора и собирающей линзы.

Для преобразования полученной энергии, переданной лазерным излучением, в электроэнергию, применяются фотодиоды. Объединяя несколько фотодиодов в кластер, появляется возможность приема и преобразования большего количества оптической мощности.



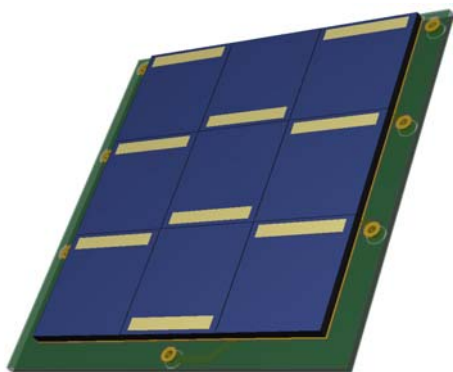


Рис. 1. Фотопреобразователь

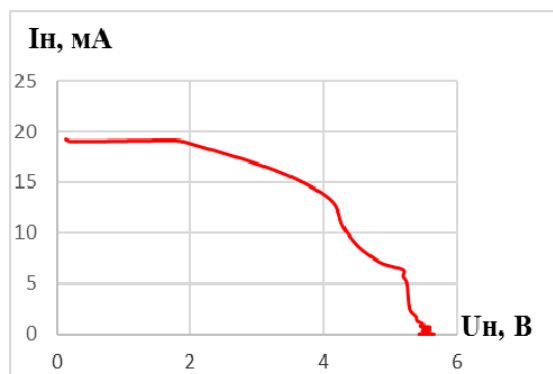


Рис. 2. График ВАХ фотопреобразователя при мощности лазера 3 Вт на расстоянии 10 см

При проектировании фотопреобразователя необходимо ориентироваться на минимизацию массогабаритных характеристик и генерацию достаточной выходной мощности. Исходя из расчетов необходимой оптимальной выходной мощности был спроектирован фотопреобразователь, состоящий из 9 последовательных кремниевых фотодиодов S-25CL. Внешний вид фотопреобразователя представлен на рис. 1, вольт-амперная характеристика – на рис. 2.

Для осуществления возможности концентрации лазерного излучения на всей поверхности фотопреобразователя, независимо от его удаленности от источника, выводы двух фотодиодов, расположенных на противоположных сторонах фотопреобразователя подключены к микроконтроллеру, что позволит определить диаметр лазерного пятна, при котором КПД передачи наиболее высок.

Передача информации точке актуации осуществляется модуляцией лазерного излучения [5]. Таким образом, представляется возможность передавать информацию точке актуации в виде двоичного кода. Прием информации осуществляется фотопреобразователем, посредством считывания уровня напряжения.

Разработанная система позволяет осуществлять передачу и прием энергии и информации по открытому оптическому каналу (скорость передачи до 3 Кбит/с), также осуществлять фокусировку и позиционирование лазерного излучения на каждой из точек актуации рефлектора на расстоянии до 7 метров.

#### Библиографические ссылки

1. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (часть 1) // Сибирский журнал науки и технологий. Красноярск, 2007.
2. Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов / С. А. Матвеев и др. // Отчет о выполнении прикладных научных исследований по этапу 2. Санкт-Петербург, 2019.

3. Крохин О. Н. К вопросу о возможности передачи энергии по оптическому каналу // Тез. докл. VIII международная науч. конференция по физике высоких плотностей энергии. Снежинск, 2005.

4. Ивакин С. В. Принципы построения лазерных комплексов дистанционного энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов // ИНТЕРЭКС-ПО ГЕО-СИБИРЬ : научный журнал. Новосибирск, 2015.

5. Передача энергии и информации по оптическому каналу для управления формой космической антенны / Л. Б. Кочин, М. А. Крылова, Д. А. Хромихин и др. // Решетневские чтения : материалы XXI междунар. науч. конф. по физике высоких плотностей энергии. Красноярск, 2017.

#### References

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. The review of designs of modern transformed space antennas (Part 1) // Siberian Journal of Science and Technology, Krasnoyarsk, 2007.
2. Development of a wireless system for controlling the shape of large-sized transformable ground and space structures using precision drives / S. A. Matveev et al. // Report on the implementation of applied research at stage 2. St. Petersburg, 2019.
3. Krokhin O. N. To the question of the possibility of energy transfer through an optical channel // Proc. doc. VIII international scientific Conference on High Energy Density Physics. Snezhinsk, 2005. Russia.
4. Ivakin S. V. Low-orbit spacecraft laser power beaming complex design principles. // Scientific journal INTEREXPO GEO-SIBERIA. Novosibirsk, 2015.
5. Transmission of energy and information through an optical channel to control the shape of a space antenna / L. B. Kochin, M. A. Krylova, D. A. Khromikhin // Reshetnev readings : materials XXI international scientific. conf. on High Energy Density Physics, Krasnoyarsk, 2017.

© Кошелев П. Е., Ширшов А. Д., Толмачев А. С., Евстигнеева Е. И., Коноплев Ю. В., 2019

УДК 629.78

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. П. Кравчуновский, С. А. Зоммер

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

*Представлены результаты исследования уровней микровибрации космического аппарата при помощи метода конечных элементов, продемонстрирована пригодность данного метода для оценки уровней микровибрации космического аппарата.*

*Ключевые слова: космический аппарат, микровибрация, вибрация, конечно-элементная модель.*

## NUMERICAL INVESTIGATION OF MICROVIBRATION BASED ON THE FINITE-ELEMENT MODEL OF SPACECRAFT

A. P. Kravchunovsky, S. A. Zommer

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: anton.kravchunovsky@yandex.ru

*The article presents the results of the study of the spacecraft micro-vibration levels using the finite element method and demonstrates the applicability of this method for evaluation of spacecraft micro-vibration levels.*

*Keywords: spacecraft, microvibration, vibration, finite-element model.*

Необходимость определения уровней микровибрации на современных КА связана с использованием в качестве полезной нагрузки (ПН) КА прецизионной аппаратуры. Вибрации способны значительно снизить ее рабочие характеристики. Поэтому в последнее время возросли требования к условиям эксплуатации прецизионной ПН.

Целью настоящей работы является определение уровней микровибрации КА как герметичного, так и негерметичного исполнения на основе КЭМ КА, а также проверка соответствия полученных результатов общим требованиям к уровням микровибрации в интерфейсах прецизионного оборудования, установленным стандартом ECSS-E-HB-32-26A.

Предполагается, что наиболее важный аспект в оценке микровибрации и степени ее влияния является передача внутренних возмущений по корпусу КА к чувствительным приборам [2].

На начальных этапах анализа неизвестны поведение конструкции от воздействия нагрузки, параметры демпфирования конструкции, а значит, и неизвестна добротность системы. Добротность характеризует качество колебательной системы, потому что чем она больше, тем меньше потери энергии.

Ввиду того, что неизвестны точные значения параметров, необходимых для анализа величины отклика, в качестве динамического воздействия в интерфейсах источников микровибрации задается единичная постоянная во времени нагрузка и, таким образом, определяется отклик в объектах воздействия. Отклик

от единичной нагрузки связан с действительным откликом через коэффициент усиления. Действительные амплитуды возмущений, возникающих в приборах, можно определить, например, посредством испытаний на микровибрацию. Сравнивая результаты испытаний с результатами анализа на воздействие от единичной нагрузки, можно вычислить коэффициент усиления.

Таким образом, при проведении анализа был вычислен отклик от воздействия единичной нагрузки. В качестве параметров демпфирования было выбрано значение добротности  $Q = 25$ .

Для выяснения зависимости уровней микровибраций в интерфейсах приборов от демпфирования конструкции КА, был проведен анализ с  $Q = 10$ .

Также было получено действительное значение добротности по результатам проведенных испытаний по формуле [3]

$$a_m(f_0) = 3\sqrt{\frac{\pi}{2} f_0 Q G_0}, \quad (1)$$

где  $a_m$  – амплитуда ускорения;  $Q$  – добротность;  $f_0$  – частота;  $G_0$  – спектральная плотность мощности (СПМ),  $\frac{mg^2}{Гц}$ .

$$\text{При } f_0 = 55 \text{ Гц, } G_0 = 0,07 \frac{mg^2}{Гц}, a_m = 105 \text{ mg:}$$

$$Q \approx 200. \quad (2)$$

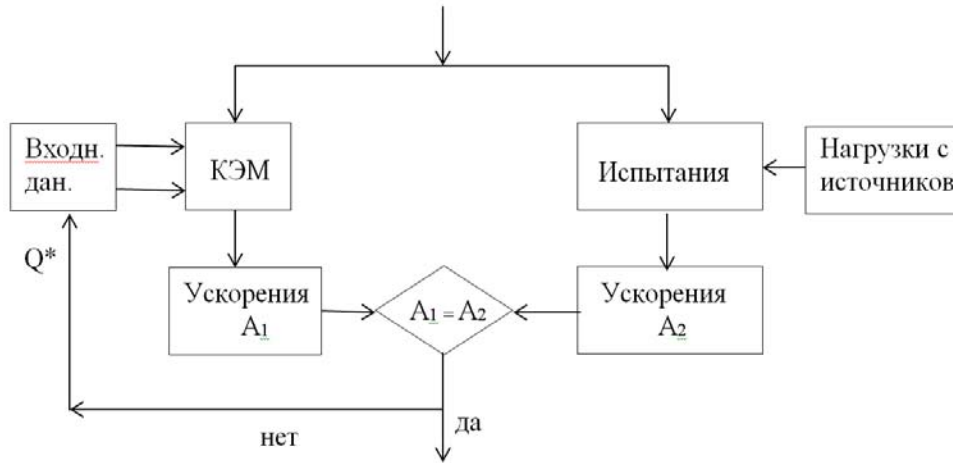


Рис. 1. Схема определения уровней микровибрации

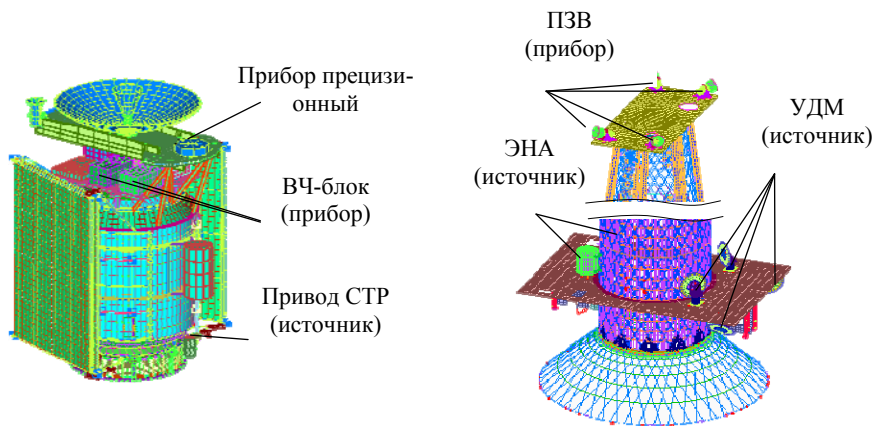


Рис. 2. КЭМ КА герметичного исполнения (слева) и негерметичного исполнения (справа); взаимное расположение источников микровибрации и прецизионной аппаратуры

Максимальное значение СПМ и соответствующее ему значение частоты в исследуемом частотном диапазоне были выбраны по результатам проведенных ранее испытаний на микровибрацию (рис. 1).

После этого анализ проводился повторно с новым значением  $Q = 200$ .

Для создания и анализа расчетных моделей использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в системе моделирования и конечно-элементного анализа конструкций NASTRAN (рис. 2). Также в модели представлены источники микровибрации и приборы прецизионной аппаратуры КА: ВЧ-блок – высокочастотный блок, СТР – система терморегулирования, ПЗВ – прибор звездный, УДМ – управляющие двигатели-маховики, ЭНА – электронасосный агрегат.

Амплитуда микровибраций принимает значения в интервале от  $10^{-6}g$  для частот менее 1 Гц и до  $10^{-3}g$  для частот свыше 100 Гц [2].

Таким образом, в работе был выполнен анализ микровибраций на основе КЭМ КА, в результате которого были определены расчетные уровни микро-

вибраций КА герметичного исполнения и КА негерметичного исполнения.

В результате выполненной работы была определена зависимость уровней микровибрации от параметров демпфирования конструкции. Параметры анализа корректировались с учетом результатов испытаний.

Также было выявлено близкое соответствие полученных результатов с общими требованиями к уровням микровибрации в интерфейсах прецизионной аппаратуры, установленными стандартом ECSS-E-HB-32-26A.

#### Библиографические ссылки

1. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М. : ДМК Пресс, 2001. 448 с., ил. (Серия «Проектирование»).
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. Ленк А., Ренитц Ю.. Механические испытания приборов и аппаратов. М., 1980.

4. Santiago Pasalodos, Ignacio García, Marcos Ubierna and etc.. Test Facility for Microvibration Requirements Verification / ECSSMET 2018 // 15th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, 28 May – 1 June 2018, ESA-ESTEC.

5. Keiji KOMATS, Hideki UCHIDA. Microvibration in spacecraft / Mechanical Engineering Reviews // The Japan Society of Mechanical Engineers. 2014. Vol. 1, № 2. 16 с.

#### References

1. Shimkovich D. G. *Raschet konstruktsiy v MSC/NASTRAN for Windows*. [Analysing of structures with MSC/NASTRAN for Windows]. Moscow : DMK Press Publ., 2001. 448 p.

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. Lenk A., Renitts Yu. *Mekhanicheskie ispytaniya priborov i apparatov*. [Mechanical testing of devices and machines]. Moscow, 1980.

4. Santiago Pasalodos, Ignacio García, Marcos Ubierna and etc. Test Facility for Microvibration Requirements Verification. ECSSMET 2018. 15th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, 28 May – 1 June 2018, ESA-ESTEC.

5. Keiji KOMATS, Hideki UCHIDA. Microvibration in spacecraft. Mechanical Engineering Reviews. The Japan Society of Mechanical Engineers. 2014. Vol. 1, № 2. 16 p.

© Кравчуновский А. П., Зоммер С. А., 2019

УДК 621.396.67

## МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВКИ ПРОФИЛЯ РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В. В. Лайзан\*, В. Б. Тайгин, С. С. Бацаев

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: statik-k26@inbox.ru

*При изготовлении антенны космического аппарата одной из основных целей является получение высокой точности отражающей поверхности. Представлена методика регулировки профиля крупногабаритного рефлектора в процессе изготовления.*

*Ключевые слова: рефлектор, силовая рама, профиль, полимерные композиционные материалы, регулировка.*

## METHOD TO ADJUST THE REFLECTOR PROFILE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS DURING ITS MANUFACTURING

V. V. Laizan\*, V. B. Taygin, S. S. Batsaev

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\*E-mail: statik-k26@inbox.ru

*At manufacture of the antenna of the spacecraft of one of main objectives is to obtain high accuracy of the reflecting surface. The technology of adjustment of a profile of a large-size reflector in the course of manufacture is presented in this article.*

*Keywords: reflector, load frame, profile, polymer composite materials, adjustment.*

Зеркальные антенны являются значимой составляющей современных космических аппаратов. Для решения новых задач в области космической связи, навигации, геодезии создаются все более совершенные космические антенны, в связи с чем, возрастают требования по точности и геометрической стабильности антенны [1; 2].

АО «ИСС» имеет большие наработки в области создания прецизионных рефлекторов из полимерных композиционных материалов (ПКМ), среди которых широкое применение получили трехслойные сотовые конструкции рефлекторов [3–5]. Однако при изготовлении крупногабаритных рефлекторов, не всегда, получается, добиться высокой точности профиля отражающей поверхности, как следствие ухудшение диаграммы направленности антенны, в связи с даже небольшими отклонениями профиля рефлектора.

В ходе конструкторско-технологического поиска нового решения, была разработана методика регулировки профиля рефлектора в процессе его изготовления. Для реализации данной схемы необходимо установить силовую раму на тыльную поверхность отражателя используя дополнительные опоры, а также систему крепления и регулировки, при этом количество точек крепления определяется в зависимости от конфигурации рефлектора и его габаритов. Предложенная схема приведена на рисунке.

Установка опор, конструкции крепления силовой рамы и самой силовой рамы необходимо производить после изготовления отражателя, до его демонтажа с поверхности формообразующей технологической оснастки.

После демонтажа производятся замеры профиля отражающей поверхности на координатно-измерительной машине (КИМ). При выявлении отклонений профиля проводится регулировка путем перемещения стержня 2 используя гайки 4, 5 (см. рисунок). При достижении необходимых результатов элементы крепежно-регулирующей конструкции стопорятся, для предотвращения самоотвинчивания резьбы при воздействии внешних нагрузок.

В ходе отработки данной методики были изготовлены два сферических рефлектора диаметром 2,2 м. Первый изготовлен с применением сотовой конструкции, а второй в виде монооболочки из полимерного композиционного материала. Результаты измерений рефлекторов после демонтажа и после проведения регулировки представлены в таблице.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что данная разработка дает возможность регулировки профиля рефлектора при измерении на координатно-измерительной машине, что в свою очередь позволяет добиться наилучшего значения профиля отражающей поверхности максимального приближая его к теоретической.

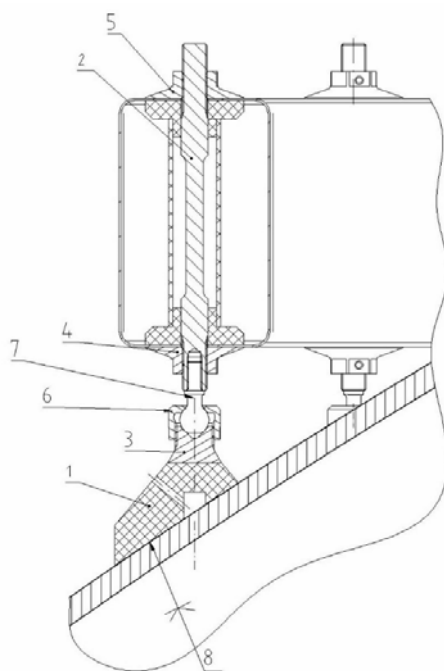


Схема крепления силовой рамы к тыльной поверхности отражателя:  
 1 – опора; 2 – стержень; 3 – оправа; 4 – гайка; 5 – гайка;  
 6 – гайка; 7 – палец; 8 – клеевое соединение

**Результаты измерений рефлекторов в ходе отработки методики регулировки**

	Сотовый рефлектор		Монооболочка из ПКМ	
	до регулировки	после регулировки	до регулировки	после регулировки
Отрицательный максимум, мм	-0,585	-0,376	-0,620	-0,213
Положительный максимум, мм	+0,651	+0,243	+0,761	+0,290
Средне квадратичное отклонение (СКО), мм	0,177	0,115	0,206	0,06

**Библиографические ссылки**

**References**

1. Бахрах Л. Д., Галимов Г. К. Зеркальные сканирующие антенны. Теория и методы расчета. М. : Наука. 1981. С. 15–30.
2. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения : учеб. пособие. Кн. 1. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005.
3. Пат. 2563198 Российской Федерации, МПК H01Q15/16. Способ изготовления рефлектора / Чичурин В. Е., Наговицин А. В., Патраев Е. В., Данилов В. Е., Михнев М. М. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнева. - № 2013155354 заявл. 12.12.2013 ; опубл. 20.09.2015, Бюл. №36. 5с.: ил.
4. Ивановская О. В., Шевцова М. А. Производство изделий из полимерных композиционных материалов : учеб. пособие. Харьков : ХАИ, 2005. 84 с.
5. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.

1. Bakhrakh L. D., Galimov G. K. Zerkalnye skaniruyushchie anteny. Teoriya i metody rascheta. [Mirror scanning antennas. Theory and methods of calculation]. Moscow : Nauka Publ., 1981. P. 15–30.
2. Chebotarev V. E. Design of spacecraft information systems: proc. Handbook: book. 1. The internal design of the spacecraft DL / Sib. gos. aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2005.
3. Chichurin V. E., Nagovitsin A. V., Patrayev E. V., Danilov V. E., Mikhnev M. M. Sposob izgotovleniya reflektora. [Way of production of a reflector]. Patent RF, no. 2563198, 2013.
4. Ivanovskaja O. V., Shevcova M. A. Proizvodstvo izdelij iz polimernyh kompozitsionnyh Uchebnoe posobie po laboratornomu praktikumu materialov [Production of products from polymeric composite materials The manual on a laboratory practical work]. Har'kov : HAI, 2005. 84 p.
5. Bataev A. A., Bataev V. A. Kompozitsionnye Kompozitsionnye materialy: stroenie, poluchenie, primenenie. [Composite materials: structure, production, application]. Novosibirsk : publisher NGTU, 2002. 384 p.

© Лайзан В. В., Тайгин В. Б., Бацаев С. С., 2019

УДК 669.713.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ АУКСЕТИЧНОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА

А. Н. Лихачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1  
E-mail: alikhachev@yandex.ru

*Представлены результаты исследований, связанных с созданием управляемых конструкций авиационно-космической техники позволяющей изменять форму поверхности, с использованием конструкций на основе полимерных композиционных материалов с ауксетичной композиционной структуры с управляемым коэффициентом Пуассона и системой актуации на основе термоактивных полимеров с фазовым переходом*

*Ключевые слова: реконфигурируемые конструкции, ауксетичные композиционные структуры, управляемый коэффициент Пуассона, термоактивные актуаторы с фазовым переходом.*

## STUDY OF THE DEFORMATION OF A RECONFIGURABLE STRUCTURE BASED ON AN AUXETIC COMPOSITE STRUCTURE WITH A CONTROLLED POISSON'S RATIO

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinova  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation  
E-mail: alikhachev@yandex.ru

*Presents the results of research related to the creation of controlled structures aerospace engineering allows you to change the shape of the surface, with the use of structures based on polymer composite materials with auxetic composite structure with a controlled Poisson's ratio and aktuali-based thermosetting polymers with phase transition*

*Keywords: reconfigurable design, auxetic composite structure, controlled Poisson's ratio, thermo actuators with phase transition.*

Создание конструкций, изменяющих свою форму и структуру в процессе функционирования с учётом изменяющихся внешних и внутренних условий, является актуальной задачей для многих систем авиационно-космической техники. Конструкции, представляющие собой ячеистые структуры, нашли широкое распространение в большом количестве разнообразных систем, использующихся в этих системах благодаря ряду уникальных положительных свойств [1]. Последние исследования показывают, что путем адаптации архитектуры ячеистых структур можно одновременно достичь улучшенных ряда их функционально-эксплуатационных характеристик таких как масса, уровень рассеяния энергии колебаний, возможность контроля вибрации структуры. В работе представлены результаты исследования ячеистой структуры с определенной топологией, обеспечивающей получение беспрецедентных свойств системы в зависимости от её рационально спроектированной архитектуры, влияющей наряду с составом и структурой композиционного материала на её функциональные характеристики. Рассмотрены физические свойства, связанные с архитектурой ячеистых структур, в частности систем с отрицательным коэффициентом Пуассона. Эти структуры демонстрируют необычную

механическую реакцию, заключающуюся в том, что они сжимаются(расширяются) в поперечном направлении при одноосном сжатии (растяжении). Был предложен ряд геометрических структур для достижения отрицательного коэффициента Пуассона [2]. Большинство теоретических и экспериментальных исследований, связанных с ауксетическими ячеистыми материалами, сосредоточены на микроструктурах с прямой топологией соединений. При этом все еще остается проблемой изучение и создание трёхмерных ауксетических систем, способных реализовать эти необычные свойства при больших деформациях.

Представленные результаты исследований показали, что можно реализовать внеплоскостную деформацию для достижения ауксетического поведения. В работе рассматривается архитектура системы ячеистой композиционной конструкции, которая демонстрирует перестраиваемый отрицательный коэффициент Пуассона в широком диапазоне приложенного одноосного растяжения, определяющего внеплоскостную деформацию в изогнутых элементах соединения структуры. Продемонстрирована концепция проектирования с помощью численного и аналитического моделирования и экспериментальных испытаний.

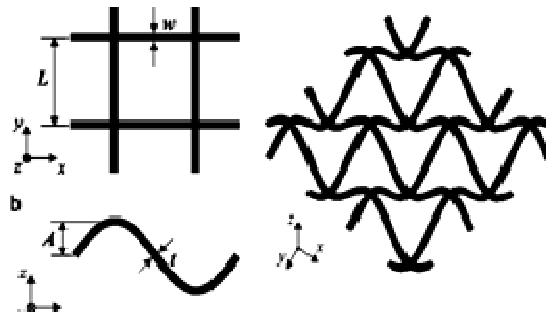


Рис. 1. Структурная схема модели ауксетичного материала

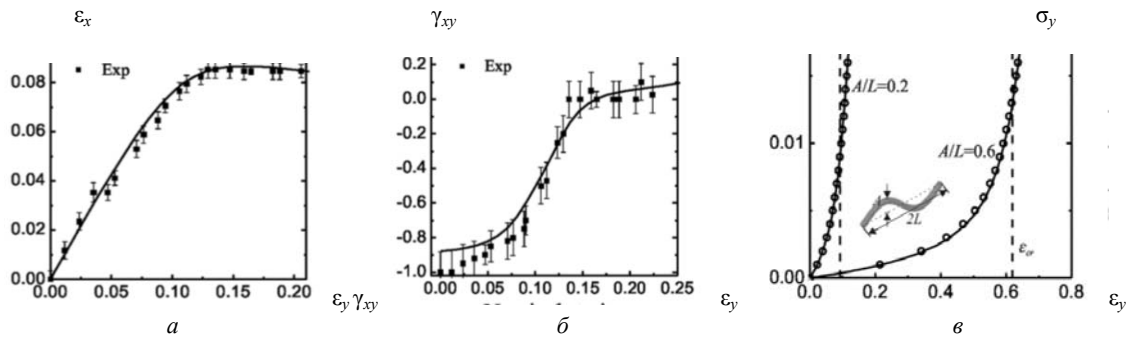


Рис. 2. Расчётные и экспериментальные результаты напряжённо-деформированного состояния ауксетичной структуры

Структура исследуемой модели является ячеистым метаматериалом, состоящим из изогнутых структурных элементов, выполненных из композита (рис. 1) который состоит из активной и несущей части, обеспечивающий требуемую деформацию структуры и её последующую фиксацию. Создана ячеистая система путём замены регулярных прямых балок на криволинейные балками во вне плоскостном направлении. Форма криволинейных элементов может быть математически описана как  $z = A \sin(\pi x/L)$ , где  $A$  – амплитуда волны, а  $L$  – длина ячейки. Рис. 1 иллюстрирует трехмерную решетчатую микроструктуру в  $2 \times 2$  единичных ячейках. Геометрия конструкции характеризуется тремя безразмерными параметрами: нормированным отношением амплитуд волн,  $A/L$ , нормированной шириной балки,  $w/L$  и её нормированной толщиной  $t/L$ .

Исследование ауксетического поведения предложенной архитектуры ячеистой структуры осуществлялось при одноосном квазистатическом испытании на растяжение на трехмерных образцах. Во всех экспериментах скорость перемещения составляет 0,1 мм/с (скорость деформации 0,001 1/с). Используя коммерческий пакет КЭ «АНСИС» проведены исследования реакции данной системы при одноосном растяжении. Результаты испытаний на одноосное растяжение и численного моделирования представлены на рис. 2 показываает зависимости напряжения-деформации при растяжении до точки разрушения. Эти структуры демонстрируют J-образные кривые напряжения-деформации, которые существенно зависят от используемой формы криволинейных элемен-

тов, что позволяет использовать этот механизм для целей управления поведением такой системы. Горизонтальная деформация ячейки сначала увеличивается во время начального линейного упругого отклика периодических структур, прежде чем она достигнет значения  $\sim 0,08$ , а затем она становится независимой от вертикальной деформации, рис. 2, а. Очевидно, что эта структура демонстрирует ауксетическое поведение.

Поскольку отклик структуры нелинеен, как показано на графике напряжений-деформаций (рис. 2, в), инкрементный коэффициент Пуассона  $\nu$  рассчитывается с использованием соотношений горизонтальной и вертикальной деформации рис. 2, б). В процессе исследования обнаружено, что приложенное одноосное растяжение вызывает внеплоскостное сжатие структуры, что связано с механизмом её деформации. Для количественного понимания механизмов, ответственных за ауксетическое поведение в рассматриваемой решетчатой системе, сформулирована аналитическая модель решетчатой системы при одноосном растяжении. Отмечается, что отрицательный эффект Пуассона возникает главным образом из-за дилатации элементарной ячейки в форме решетки. При этом криволинейные элементы деформируются от изогнутых до прямых в обоих направлениях, что указывает на полное расширение вдоль горизонтального направления при вертикальном растяжении.

Представленная аналитическая модель объясняет причину ауксетического поведения этой ячеистой структуры и демонстрирует переход режима деформации от доминирующего изгиба к доминирующему



растяжению при одноосном её растяжении. Показано, что использование такого подхода позволяет осуществлять целенаправленное управление топологией конструкции в зависимости от воздействия на неё внешних и внутренних факторов, возникающих в процессе её эксплуатации.

#### Библиографические ссылки

1. Лихачёв А. Н. Интеллектуальные конструкции – новый подход к созданию изделий авиационно-космической техники // Актуальные проблемы защиты и безопасности : труды XXII Всеросс. научно-практич. конф. РАН. Т. 1 «Вооружение, военная и специальная техника. 2019. С. 216–222.

2. Sun Y. & Pugno, N. M. In plane stiffness of multifunctional hierarchical honeycombs with negative

Poisson's ratio substructures, in Composite Structures. 2013. № 106. P. 681–689.

#### References

1. Likhachev A. N. Intelligent designs – a new approach to the creation of products of aerospace technology // Actual problems of protection and safety. Proceedings of the XXII all-Russian scientific and practical conference RARAN. Vol. 1 " Weapons, military and special equipment. 2019. P. 216–222.

2. Sun Y. & Pugno, N. M. In plane stiffness of multifunctional hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio substructures, in Composite Structures. 2013. № 106. P. 681–689.

© Лихачев А. Н., 2019

УДК 629.78

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КА ПУТЕМ УНИФИКАЦИИ УЗЛОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ

И. А. Лушин, И. А. Кравченко

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*Рассматривается возможность повышения эффективности КА путем унификации узлов исполнительной автоматики.*

*Ключевые слова: космический аппарат, блок подачи рабочего тела.*

## EFFICIENCY OF SATELLITE INCREASING BY CORRECTION SYSTEM EXECUTIVE AUTOMATOS UNIFYING

I. A. Lushin, I. A. Kravchenko

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*Possibility of the efficiency of satellite increasing by executive automatos unifying the is discussed in the article.*

*Keywords: satellite, working fluid supply unit.*

С необходимостью в постоянном росте эффективности космических аппаратов (КА) увеличиваются их весовые характеристики. Энергетические возможности существующих РН и РБ не обеспечивают задачу прямого выведения. В последнее время применяется альтернативная схема выведения КА на заданную орбиту с использованием штатных электрореактивных двигательных установок (ЭРДУ) КА. Подачу всего запаса рабочего тела (РТ), необходимого для работы штатных ЭРДУ и эксплуатации КА в течение всего срока активного существования (САС) обеспечивает блок подачи рабочего тела (БПРТ) подсистемы коррекции КА [1].

БПРТ предназначен для подачи рабочего тела из блоков хранения рабочего тела в блоки коррекции, с понижением давления рабочего тела от уровня в БПРТ до уровня, обеспечивающего работу блока коррекции.

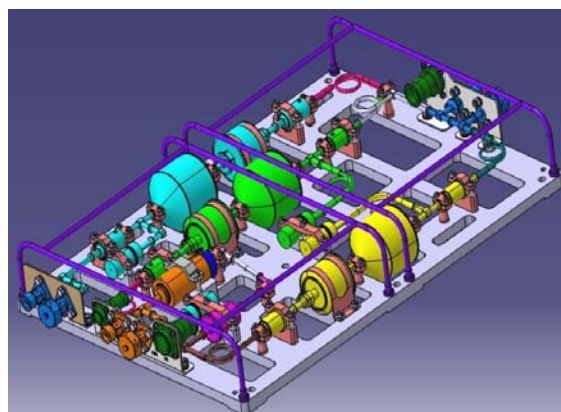
БПРТ выполняется в виде моноблока, представляющего собой комбинацию функциональных элементов пневмомагистрали, соединенных между собой с помощью сварки (пайки), все элементы располагаются на раме и обеспечивают:

- открытие и закрытие газовых трактов (электроклапаны);
- понижение входного давления рабочего тела до заданного уровня (редукторы давления);
- снижение пульсаций давления рабочего тела на выходе редукторов (ресиверы);
- подачу штатного и технологических рабочих тел на вход и выход БПРТ (присоединительные штуцеры и проверочные горловины);
- необходимую чистоту рабочего тела в трактах БПРТ (фильтры);

- поддержание теплового режима элементов БПРТ и обеспечение газового состояния рабочего тела (нагреватели, датчики температуры);
- контроль давления рабочего тела в трактах БПРТ (датчики давления);
- подачу электрического питания на элементы БПРТ (электросоединители и кабели);
- соединение элементов БП (трубопроводы и арматура);
- жесткое крепление элементов, входящих в состав БПРТ и крепления самого блока на изделие (основание БПРТ).

ЭРДУ коррекции и довыведения работает на разных номиналах давления, а существующие БПРТ способны обеспечить только одно значение давления. Поэтому для КА с системой довыведения используется 2 БПРТ.

Один из вариантов унифицированного БПРТ представлен на рисунке.



Предполагаемый вид БПРТ

Принцип работы такого БПРТ заключается в том, что редуцирование давления из блока хранения рабочего тела происходит в 2 этапа, причем первый этап понижения давления выполняется с резервированием, так как перепад давления на первом этапе очень велик и для того что бы обеспечить необходимый запас надежности предлагается зарезервировать эту ветвь. На втором этапе редуцирование происходит на более низких давлениях, поэтому эту ветку предлагается не резервировать.

Применение БПРТ с возможностью выдавать несколько номиналов рабочего давления является перспективной задачей, так как использование такого устройства способствует снижению массы, уменьшению места занимаемого на КА, уменьшению коли-

чества трубопроводов и упрощению монтажа БПРТ на КА.

#### **Библиографическая ссылка**

1. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

#### **Reference**

1. Chebotarev V. E. Osnovi proektirovanija kosmicheskikh apparatov informacionnogo obespechenija. Siberian aerospace university. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.

© Лушин И. А., Кравченко И. А., 2019

УДК 629.7.069

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КАНТОВАТЕЛЯ ДЛЯ СБОРКИ МОДУЛЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ (МПН) КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТЯЖЕЛОГО КЛАССА

Е. Ю. Мартынова, Р. П. Простакишин, П. В. Ошеко

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: E.lena-Mart@yandex.ru

*Рассматривается доработка и разработка универсального кантователя, для панелей модуля полезной нагрузки, на котором непосредственно осуществляются как сборочные, так и испытательные работы.*

*Ключевые слова: сборка панелей КА, универсальный кантователь, модуль служебных систем (МСС), модуль полезной нагрузки (МПН).*

## DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL TILTER FOR THE ASSEMBLY OF THE PAYLOAD MODULE (MPN) OF HEAVY CLASS SPACECRAFT

E. Y. Martynova, R. P. Prostackishin, P. V. Osheko

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: E.lena-Mart@yandex.ru

*We consider the completion and development of a universal tilter for the panels of the payload module, which is directly carried out both Assembly and test work.*

*Keywords: Assembly panels ON, versatile tilter, the module of service systems (MSS), the payload module (MPN).*

Современные космические аппараты строятся, как правило, по модульному принципу. В соответствии с этим принципом в состав космического аппарата входят модуль полезной нагрузки (МПН) и модуль служебных систем (МСС). Бортовая система, выполняющая целевую функцию проекта, является полезной нагрузкой. Бортовые системы, обеспечивающие штатные условия для работы КА и выполнения целевой функции, являются служебными [1].

МСС служит для размещения на нем приборов и систем, обеспечивающих нормальное функционирование космического аппарата. В состав МСС входят следующие системы: системы электропитания (СЭП), состоящей из аккумуляторной батареи и батареи солнечной, предназначенной для обеспечения электроэнергией приборов космического аппарата; бортовой комплекс управления (БКУ); командно-измерительной системы, служащей для контроля параметров управления космическим аппаратом; и системы терморегулирования (СТР), обеспечивающей заданный температурный режим для нормального функционирования приборов; системы ориентации и стабилизации (СОС); системы коррекции (СК), для обеспечения требуемого положения и орбиты космического аппарата [1; 2].

Модуль же полезной нагрузки предназначен для размещения тех приборов и систем, которые служат для выполнения целевых задач, возлагаемых на разрабатываемые КА. МПН включает в себя: бортовой ретранслятор (РТР); антенно-фидерную систему (АФУ); систему наведения антенн; подсистему КИС объединенные конструкцией. Комплектация МПН

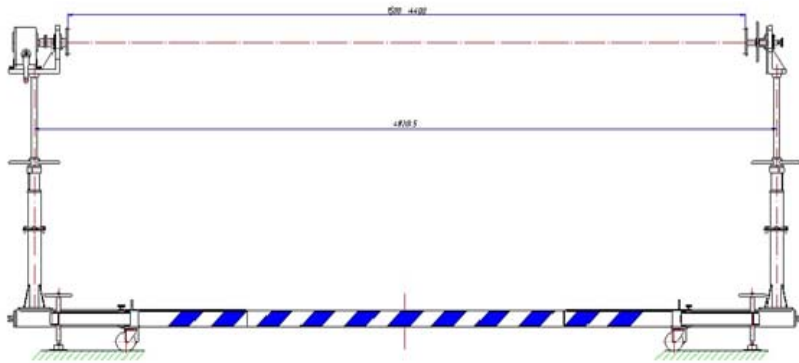
определяется полетной задачей космического аппарата. МПН состоит из силового корпуса, на котором устанавливаются блоки ретранслятора и антенно-фидерная система. Силовой корпус МПН состоит из набора сотопанелей, соединенных между собой в единую конструкцию [3].

В процессе изготовления МПН приборные панели необходимо закреплять на различном технологическом оборудовании разной высоты и разворота по плоскости. Для проведения данных работ необходимо МПН установить на кантователь, где впоследствии на панели модуля полезной нагрузки устанавливаются необходимые приборы и происходят электрические испытания в соответствии с техническим заданием на изготовление МПН КА.

Кантователь (от нем. kanten – переворачивать) предназначен для перевода изделия из вертикального положения в горизонтальное и из горизонтального в вертикальное, а также для проведения на изделии монтажных и регулировочных работ. Конструкция кантователя предусматривает возможность прокрутки изделия вокруг центральной оси [4].

Кантователь (см. рисунок) состоит из жесткой рамы; стоек; редуктора; колёс передвижения; домкратов. Грузоподъемность – 500 кг [5].

Проведя анализ имеющихся конструкций, можно сказать, что для монтажа приборов на приборных панелях уже разработаны и изготовлены кантователи различных типов в зависимости от назначения. Но в настоящее время одними из основных требований являются место сборки и универсальность применяемой оснастки.



Кантователь

Имеющиеся конструкции кантователей имеют и ряд недостатков: отсутствие регулировки по высоте, что не позволяет в дальнейшем перейти к сборке других типов МПН на том же оборудовании; малая функциональность, т. е. невозможность переворачивать плоскость панели на  $360^\circ$ ; длительное время сборки и др.

Главной задачей при выборе конструкции кантователя является обеспечение закрепления приборных панелей в процессе работ с МПН, а так же при межучастковой транспортировке. Проанализировав технологию изготовления МПН, выяснили, что на различных этапах сборки для установки приборных панелей на кантователь используются различные такелажные приспособления, которые приходится каждый раз переустанавливать при переходе к новому этапу сборки или испытаний.

Для устранения вышеуказанных недостатков предлагается применять универсальный кантователь, дающий возможность регулировки по высоте на различных этапах сборки без замены кантователя. Для минимизации рисков возникновения нештатных ситуаций, связанных с монтажом/ демонтажем схемы испытаний, разработаны следующие предложения по доработке кантователя, на котором непосредственно осуществляются как сборочные, так и испытательные работы:

1. Ввести в конструкцию регулировочный винт, тем самым давая возможность регулировать панели по высоте, на разных этапах сборки.
2. Заменить редуктор с механическим приводом на редуктор с электрическим приводом, что значительно упростит и ускорит рабочий процесс.
3. Стойки доработать.
4. Увеличить грузоподъемность колес кантователя, что позволит работать с панелями МПН тяжелого класса.

Доработанный кантователь можно использовать при создании других МПН, которые будут изготавливаться на базе этой же платформы, оборудование будет многофункциональным. Внедрение данных предложений в технологию сборки и автономных испытаний МПН позволит повысить качество данных технологических операций, а впоследствии сократить время создания полезной нагрузки и космического аппарата в целом.

### Библиографические ссылки

1. Гуцин В. Н. Основы устройства космических аппаратов. М. : Машиностроение, 2003. 272 с.
2. Технология производства космических аппаратов : учебник для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.
3. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
4. Определение термина «Кантователь», Официальный сайт Академик, Большая советская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: [http://dic.academic.ru/dic\\_nsf/bse/93120/Кантователь](http://dic.academic.ru/dic_nsf/bse/93120/Кантователь) (дата обращения: 10.08.2019).
5. Основные технологические процессы общей сборки в производстве летательных аппаратов : учеб. пособие / В. А. Барвинок, А. Н. Кирилин, П. А. Докукина. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 80 с.

### References

1. Gushchin V. N. Basics of spacecraft design. Moscow : Mechanical Engineering, 2003. 272 p.
2. Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov: university textbook / N. A. Testoyedov [et al.]. Sib. state aerocosmic. univ. Krasnoyarsk, 2009. 352 p.
3. Chebotarev V. E., Kosenko V. E the basics of spacecraft design information systems. Sib. state aerocosmic. univ. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.
4. The definition of "Turnover", the Official website of the Academician, the Great Soviet encyclopedia [Electronic resource]. URL: [http://dic.academic.ru/dic\\_nsf/bse/93120/a/Tilter](http://dic.academic.ru/dic_nsf/bse/93120/a/Tilter) (access: 10.08.2019).
5. Barvinok V. A., Kirillin A. N., Dokudina P. A. Osnovnyye tekhnologicheskiye protsessy obshchey sborki v proizvodstve letatel'nykh apparatov [The main technological processes of general assembly in the production of aircraft]. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov, 2007. 80 p. (In Russian).

© Мартынова Е. Ю., Простакишин Р. П.,  
Ошеко П. В., 2019

## СИНУСНО-КОСИНУСНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

П. П. Моисеев, И. И. Нечушкин

ООО «Научно-производственное предприятие «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрен синусно-косинусный датчик углового положения на эффекте Холла для контроля перемещений элементов конструкций космических аппаратов. Показаны экспериментальные результаты его обработки.*

*Ключевые слова: синусно-косинусный датчик углового положения, элементы конструкции космического аппарата, преобразователь Холла.*

## SINE-COSINE ANGULAR POSITION SENSOR

P. P. Moiseev, I. I. Nechushkin

“Scientific-production enterprise “ASTRON ELECTRONICS” Ltd.  
2, Veselaya Str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*A sine-cosine angular position sensor based on the Hall effect is considered to control the movements of structural elements of spacecraft. The experimental results of its development are shown.*

*Keywords: sine-cosine angular position sensor, structural elements of the spacecraft, Hall transducer.*

Для контроля угловых положений конструкций космического аппарата (КА) в [1; 2] нами был предложен синусно-косинусный датчик углового (положения) (ДУП), показанный на рис. 1. Особенностью данного ДУП является его технологическая простота при получении высокой точности контроля углового положения, которая обеспечивается применением одной магнитной системы на кольцевом постоянном магните, намагниченном аксиально, с двумя магнитопроводами и зондами с двумя преобразователями Холла (ПХ) на каждом. Магнитопроводы выполнены в форме колец с 32 выступающими секторными зуб-

цами на каждом, зубцы направлены встречно друг к другу и сдвинуты по окружности относительно друг друга на расстояние полушага своих зубцов. Зонды с ПХ устанавливаются в воздушном зазоре между зубцами магнитопроводов. При вращении вала с магнитной системой создается знакопеременное магнитное поле относительно ПХ, что обеспечивает выходные сигналы ПХ одного зонда в форме синуса и косинуса, а количество зубцов магнитопровода разбивает угол поворота  $360^\circ$  на 32 сектора по  $11,25^\circ$  каждый.

Внешний вид опытного образца датчика показан на рис. 2.

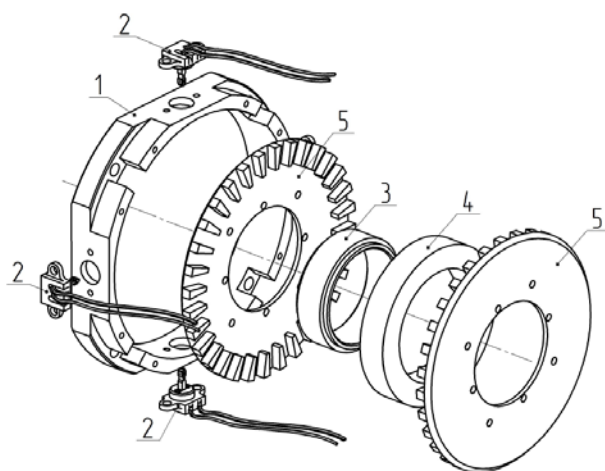


Рис. 1. Конструкция ДУП:  
1 – корпус (статор); 2 – зонды с двумя ПХ на каждом;  
3 – вал; 4 – кольцевой постоянный магнит;  
5 – магнитопроводы с зубцами



Рис. 2. Внешний вид опытного образца ДУП

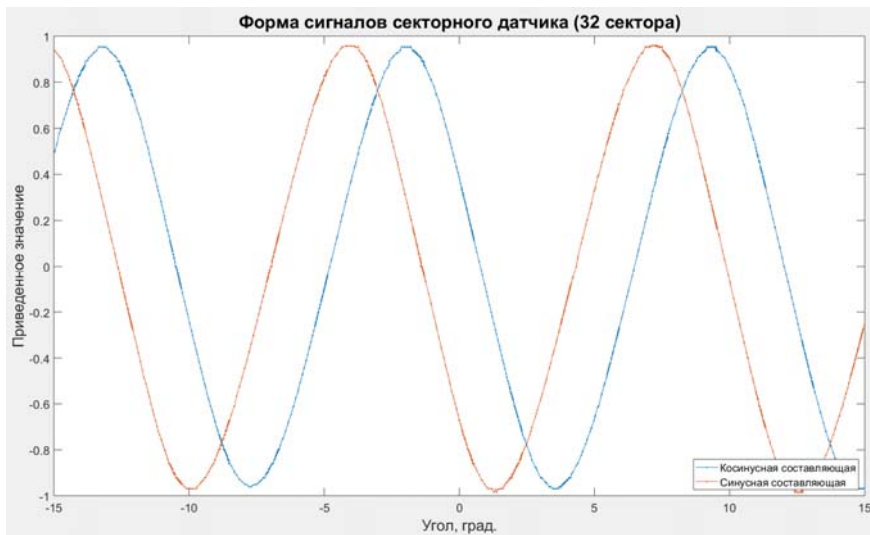


Рис. 3. Выходные сигналы ПХ одного зонда, полученные с АЦП

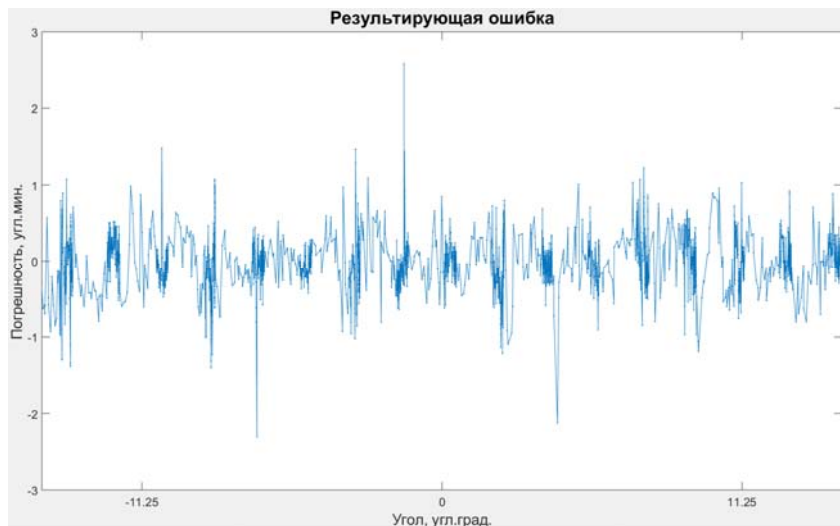


Рис. 4. Результирующая ошибка измерения углового положения

ДУП имеет внешний габаритный диаметр 62 мм, внутренний диаметр отверстия вала 20 мм, толщина датчика 10 мм.

Магнитная система собрана на одном кольцевом редкоземельном постоянном магните (Nd-Fe-B) сплава ЧЗ6Р кл. Г (ТУ 6391-002-55177547–2005) с внешним диаметром 34 мм, внутренним диаметром 24 мм и толщиной 6 мм.

Масса датчика равна 100 г. При токе питания одного зонда с двумя ПХ равным 17,7 мА выходные сигналы каждого ПХ имели размах амплитуды порядка 14 мВ.

На рис. 3 показаны выходные сигналы ПХ одного зонда, полученные с аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). На рис. 4 показана результирующая ошибка измерения углового положения опытным образцом датчика, полученная при его калибровке высокоточным датчиком.

#### Библиографические ссылки

1. Моисеев П. П., Нечушкин И. И. Датчики контроля положений элементов трансформируемых конструкций космических аппаратов/ // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–11 нояб. 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 151–152.
2. Пат. на полезную модель 178708 Российская Федерация, МПК G 01 B 7/30, G 01 R 33/07, H 02 K 29/08, H 02 K 29/06. Бесконтактный прецизионный датчик углового положения вала / П. П. Моисеев, И. И. Нечушкин; заявитель и патентообладатель ООО «НПП «Астрон Электроника». № 2017137172. Заявл. 23.10.2017. Зарегистр. 17.04.2018

**References**

1. Moiseev P. P., Nechushkin I. I. Sensors for monitoring the positions of elements of transformable structures of spacecraft // Reshetnev readings : materials of the XXI International. scientific-practical conf. In memory of the General Designer of rocket and space systems, academician M.F. Reshetnev (Nov. 08–11, 2017, Krasnoyarsk): at 2 p.m. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Siberian State University named after

M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2017. Part 1. P. 151–152 (In Russ.).

2. Pat. Utility Model 178708 Russian Federation, IPC G 01 B 7/30, G 01 R 33/07, H 02 K 29/08, H 02 K 29/06. Non-contact precision shaft angle sensor / P. P. Moiseev, I. I. Nechushkin; Applicant and patent holder NPP Astron Electronics Ltd. No. 2017137172. Decl. 10/23/2017. Zaregistr. 04/17/2018 (In Russ.).

© Моисеев П. П., Нечушкин И. И., 2019



УДК 629-238.9

## СПУСКОВОЙ МЕХАНИЗМ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОСТАНОВОМ ДЛЯ РАСКРЫТИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

П. П. Моисеев, И. И. Нечушкин

ООО «Научно-производственное предприятие «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрена система раскрытия конструкций космических аппаратов. Предложен спусковой механизм с промежуточным остановом для раскрытия конструкций космического аппарата. Описаны его преимущества.*

*Ключевые слова: спусковой механизм, солнечные батареи, трансформируемые космические конструкции, управляемое раскрытие.*

## TRIGGER MECHANISM WITH INTERMEDIATE STOP FOR DEPLOYMENT OF THE SPACECRAFT STRUCTURES

P. P. Moiseev, I. I. Nechushkin

“Scientific-production enterprise “ASTRON ELECTRONICS” Ltd.  
2, Veselaya Str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*A system for revealing spacecraft structures is considered. A trigger with an intermediate stop is proposed for opening the spacecraft structures. Its advantages are described.*

*Keywords: trigger, solar panels, transformable space structures, controlled deployment.*

При разворачивании панелей солнечных батарей (СБ) с использованием электромеханических приводов раскрытия применяются системы тросовой синхронизации и элементы задержки. Раскрытие подвижных узлов космического аппарата (КА) с изменением скорости раскрытия в процессе разворачивания, включая временный останов и возобновление раскрытия, позволяет обеспечить применение управляемых спусковых механизмов. В [1; 2] показан спусковой механизм, в котором скорость раскрытия задается подачей последовательности напряжений на два электромагнита управления спусковыми рычагами.

Нами предлагается спусковой механизм с постоянной скоростью раскрытия, возможностью промежу-

точных временных остановов и контроля углового перемещения.

На рис. 1 показан внешний вид спускового механизма.

Спусковой механизм состоит из планетарного редуктора, анкерного спускового устройства, электромагнитного тормоза и миниатюрного датчика углового положения (ДУП) на преобразователях Холла. Скорость раскрытия задается анкерным спусковым устройством.

Останов производится при подаче напряжения на электромагнитный тормоз, при снятии напряжения раскрытие продолжается. На рис. 2 показаны габаритные размеры данного спускового механизма.

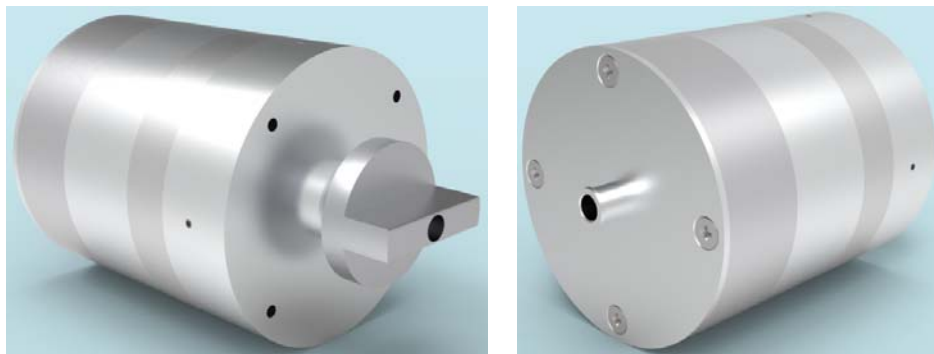


Рис. 1. Внешний вид спускового механизма

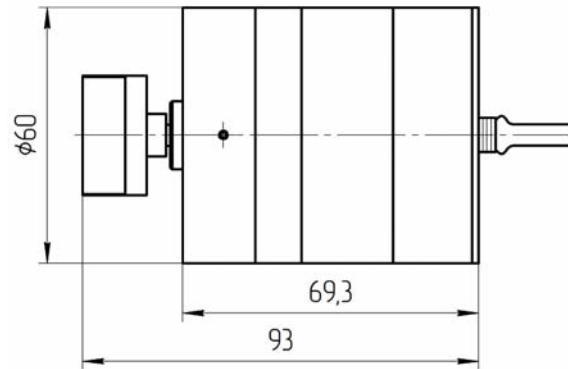


Рис. 2. Габаритные размеры спускового механизма

Применение предлагаемого спускового механизма позволяет упростить управление и уменьшить энергопотребление по сравнению с устройством, показанном в [1].

#### Библиографические ссылки

1. Моисеев П. П., Викторов А. И. Управляемый спусковой механизм для раскрытия конструкций космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 141–142.

2. Пат. на полезную модель 180495 Российская Федерация, МПК G 01 B 7/30, G 01 R 33/07, H 02 K 29/08, H 02 K 29/06. Устройство раскрытия подвижных узлов космического аппарата / П. П. Моисеев, А. И. Викторов, А. К. Подмастерьев; заявитель и патентообладатель ООО «НПП «Астрон Электроника».

№ 2017122877. Заявл. 27.06.2017. Зарегистр. 14.06.2018.

#### References

1. Moiseev P. P., Viktorov A. I. Guided trigger for the disclosure of the spacecraft constructions // Reshetnev readings : materials of the XX Anniversary international scientific-practical Conf. in memory of the general designer of rocket and space systems academician M. F. Reshetnev (November 9–12, 2016, Krasnoyarsk) : at 2 m. / under the general editorship of Yu. Yu. Loginov; Sib. state aerospace university. Krasnoyarsk, 2016. P. 1. P. 141–142 (in Russ.).

2. Pat. Utility Model 180495 Russian Federation, IPC G 01 B 7/30, G 01 R 33/07, H 02 K 29/08, H 02 K 29/06. The device for the disclosure of the moving nodes of the spacecraft / P. P. Moiseev, A. I. Viktorov, A. K. Podmasteriev; Applicant and patent holder NPP Astron Electronics Ltd. No. 2017122877. Decl. 06/27/2017. Zaregistr. 06/14/2018. (in Russ.).

© Моисеев П. П., Нечушкин И. И., 2019

УДК 629.7.023.4

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В. Н. Преснов, А. Д. Леоненков, Ю. А. Оберемок, Т. С. Осипенко

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: viktor.presnov95@gmail.com

*Рассмотрена топологическая оптимизация кронштейна поддержки антенн командно-измерительной системы, показаны перспективы применения аддитивных технологий при создании космических аппаратов.*

*Ключевые слова: аддитивное производство, топологическая оптимизация, 3D-печать.*

## TOPOLOGICAL OPTIMISATION OF ELEMENTS OF CONSTRUCTION OF COMMAND-MEASURING'S SYSTEMS

V. N. Presnov, A. D. Leonenkov, Yu. A. Oberemok, T. S. Osipenko

Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: viktor.presnov95@gmail.com

*Topological Optimization of support bracket for command-measuring systems has been considered, perspectives of using the additive technologies in creating the spacecraft were shown.*

*Keywords: additive production, topological optimization, 3D printing.*

В течение нескольких последних десятилетий мировая промышленность находится в состоянии постоянных изменений. Не является исключением и инженерно-конструкторская область, где благодаря развитию вычислительных технологий и вычислительных мощностей, а также внедрению новых производственных технологий (в частности технологий аддитивного производства) происходит постепенная смена парадигмы проектирования конструкций [1].

Для того чтобы проектируемые изделия были востребованы на рынке, их эксплуатационные характеристики должны быть не хуже аналогичных характеристик промышленных изделий ведущих мировых производителей. Таким образом, важнейшей становится проблема проектирования конструкции под заданные критерии качества (целевые показатели) [2]. В этом может помочь методика оптимального проектирования конструкций, основанная на использовании мировых достижений в области математического моделирования и оптимизации с использованием интегрированных систем компьютерного проектирования и инжиниринга, а также с последующим изготовлением продукта методом 3D-печати [3].

С течением времени, когда технология 3D-печати станет более доступной, изделия, созданные с помощью технологий аддитивного производства, будут более востребованы, чем те, что изготавливаются актуальными на данный момент технологиями [4]. В качестве примера сравним характеристики типового кронштейна поддержки антенн командно-измери-

тельной системы и спроектированной на его основе бионической конструкцией, при разработке которой использовалась топологическая оптимизация. Исходный кронштейн (рис. 1) выполнен из сплава АМг6. Нагружен антеннами массой 0,26 кг и 0,39 кг.

Масса самого кронштейна составляет 0,48 кг. Требования по прочности и жёсткости к кронштейну:

Первая собственная частота  $f_1$  должна быть больше 100 Гц;

Конструкция кронштейна антенн КИС должна обеспечивать прочность от одновременного действия линейных ускорений по трём направлениям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  равные 20g.

Бионическая конструкция (рис. 2) будет изготовлена на 3D-принтере из сплава AlSi10Mg. Нагружена аналогично исходному кронштейну. Требования по прочности и жёсткости аналогичны исходному кронштейну.

Для каждого из кронштейнов были произведены расчёты на прочность и жесткость, определён запас прочности. Результаты анализа сведены в таблице.

Выводы: в результате оптимизации итоговая конструкция легче исходного кронштейна в 2,5 раза. Оптимизированная конструкция при эксплуатационной нагрузке удовлетворяет требованиям к изделию.

Однородная, монолитная конструкция, напечатанная на 3D-принтере, более проста в производстве и не требует множества этапов изготовления, сварки и последующей сборки отдельных частей, как в случае с оригинальным кронштейном.

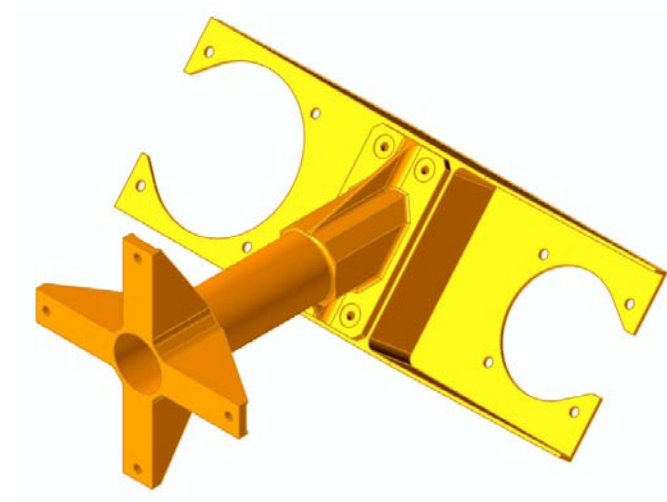


Рис. 1. Изометрический вид исходного кронштейна

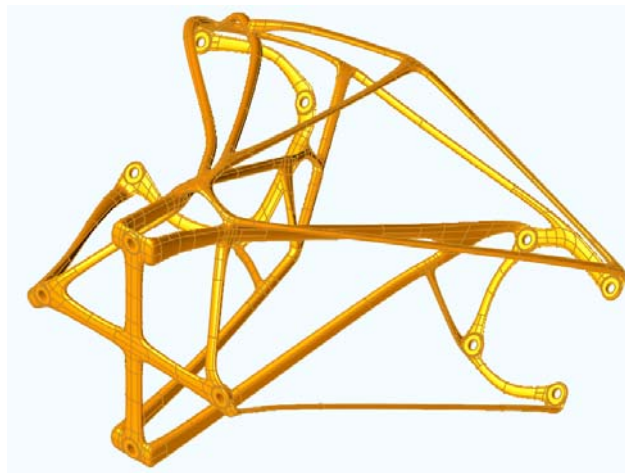


Рис. 2. Изометрический вид бионической конструкции

**Результаты анализа**

Параметры	Исходный кронштейн	Итоговая конструкция	Разница (отношение итог. к исх.), %
Максимальное растяжение $\sigma_{\text{растяж}}$ , МПа	41,51	77,39	186,4
Максимальное сжатие $\sigma_{\text{сжат}}$ , МПа	-61,97	-61,73	99,6
Максимальное напряжение на сдвиг $\sigma_{\text{сдвиг}}$ , МПа	31,13	40,17	129
Максимальное напряжение по Мизесу $\sigma_{\text{по Мизесу}}$ , МПа	61,91	77,39	125
Максимальное главное напряжение $\sigma_{\text{главн}}$ , МПа	54,34	79,84	146,9
Первая собственная частота $f_1$ , Гц	115	104	90,4
Запас прочности $n$	2,34	2,06	88
Масса $m$ , кг	0,48	0,19	39,6

Из-за уменьшения количества этапов производства, в свою очередь, сокращается общее время производства детали, также отметим практически полное отсутствие отходов и возможность повторного использования металлического порошка

Проектирование на основе оптимизации дало лучшие результаты, чем «традиционное». В дальнейшем, при удешевлении производства и технологии,

подход к проектированию на основе оптимизации найдет большее распространение.

**Библиографические ссылки**

1. Bendsoe M. P., Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Struct Design Using a Homogenization Method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. Vol. 71. P. 197–224.

2. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. СПб. : СПбГУ, 2013. 221 с.

3. Описание технологии SLS [Электронный ресурс]. URL: [www.eosab.ru](http://www.eosab.ru) (дата обращения: 10.08.2019).

4. Canessa E., Fonda C., Zennaro M. Low-cost 3D printing for science, education, sustainable development // ICTP. 2013. 184 p.

Method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. Vol. 71. P. 197–224.

2. Additive technologies in mechanical engineering / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. СПб. : SPbSU, 2013. 221 p.

3. Description of the SLS technology [Electronic Resource]. URL: [www.eosab.ru](http://www.eosab.ru) (access: 10.08.2019).

4. Canessa E., Fonda C., Zennaro M. Low-cost 3D printing for science, education, sustainable development // ICTP. 2013. 184 p.

#### References

1. Bendsoe M. P., Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Struct Design Using a Homogenization

© Преснов В. Н., Леоненков А. Д.,  
Оберемок Ю. А., Осипенко Т. С., 2019

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ ЭТИЛЕН-ПРОПИЛЕНОВЫХ КАУЧУКОВ

А. С. Пушница<sup>\*1</sup>, В. Д. Ворончихин<sup>1</sup>, Т. А. Шалыгина<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. газ. «Красноярский рабочий», 31<sup>2</sup>ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

\*E-mail: apushnitsa@inbox.ru

*Рассмотрено тепловое старение этилен-пропиленовых каучуков, представлены результаты метода термогравиметрического анализа.*

*Ключевые слова: этилен-пропиленовые каучуки, термостабильность, ТГА.*

## RESEARCH OF THERMAL STABILITY OF ETHYLENE-PROPYLENE RUBBERS

A. S. Pushnitsa<sup>1\*</sup>, V. D. Voronchikhin<sup>1</sup>, T. A. Shalygina<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation<sup>2</sup>FRC «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

\*E-mail: apushnitsa@inbox.ru

*The article considers the thermal aging of ethylene-propylene rubbers, presents the results of the method of thermogravimetric analysis.*

*Keywords: ethylene-propylene rubbers, thermal stability, TGA.*

При создании УФ-стойких покрытий на основе этилен-пропиленовых каучуков [1], важным является изучение различных видов старения, в том числе теплового старения.

Термостабильность каучука определяет условия температурного режима его переработки и целевого использования изделий на его основе. Известно [2–4], что этилен-пропиленовые каучуки имеют повышенную стойкость к различным видам старения. Основные цепи сополимера и терполимера не содержат двойных связей (см. рис. 1), что и обуславливает их повышенную стойкость к различным видам старения, в том числе теплового [5].

Для получения достоверной информации о термостойкости этилен-пропиленовых каучуков в качестве

объектов исследования использованы полимеры марки СКЭПТ-50 и Keltan<sup>®</sup> 512, был выбран метод термогравиметрического анализа (ТГА). Исследования проводились на дериватографе TA Instruments модель Discovery DSC25 (США).

Средой, в которой проводились исследования, являлся инертный газ (азот). Исследование газов, отводимых из камеры сгорания дериватографа, осуществлялось на ИК-спектрометре Thermo Scientific Nicolet iS10 (США).

Кривые Грам–Шмидта, представленные на рис. 1, 3, 4 имеют видимый сдвиг, он связан с задержкой устанавливаемой совмещающей системы ТГА-ИК, который требует корректировки по времени эксперимента.

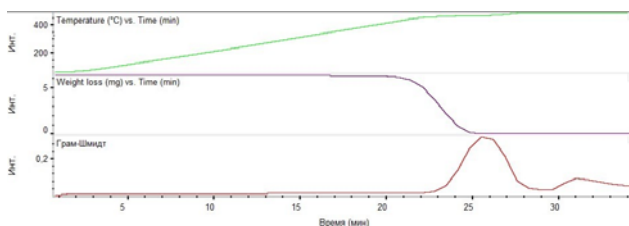
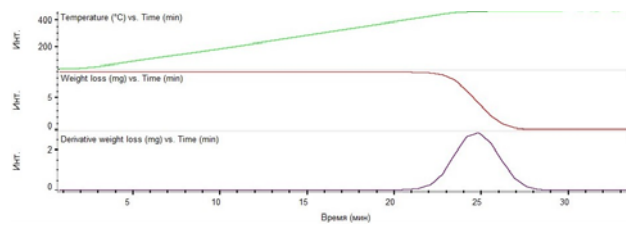


Рис. 1. Термограмма нагрева серийного каучука СКЭПТ-50

Рис. 2. Термограмма нагрева серийного каучука Keltan<sup>®</sup> 512

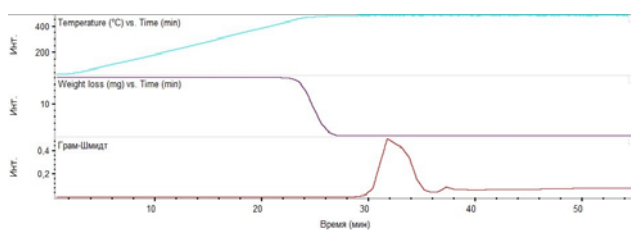


Рис. 3. Термограмма нагрева каучука СКЭПТ-50, не содержащего антиоксидант

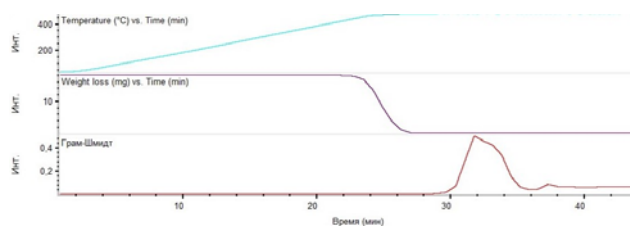


Рис. 4. Термограмма нагрева каучука Keltan®512, не содержащего антиоксидант

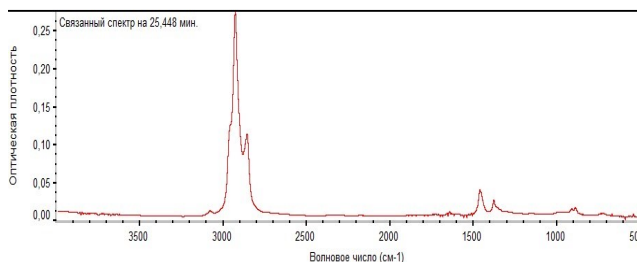


Рис. 5. ИК-спектры серийного каучука СКЭПТ-50

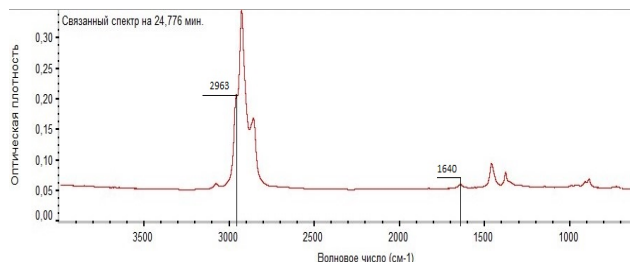


Рис. 6. ИК-спектры серийного каучука Keltan®512

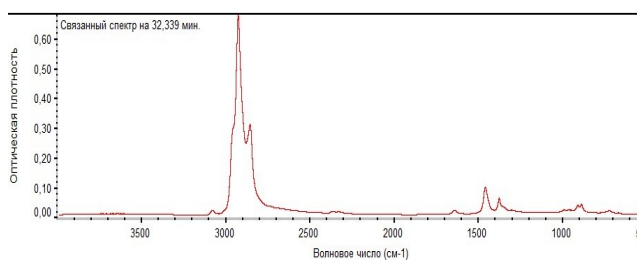


Рис. 7. ИК-спектры каучука СКЭПТ-50, не содержащего антиоксидант

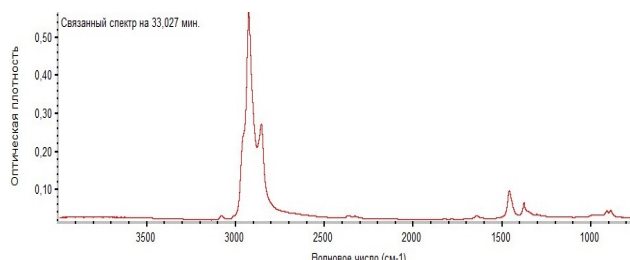


Рис. 8. ИК-спектры каучука Keltan®512, не содержащего антиоксидант

Сравнительный анализ термостабильности каучуков СКЭПТ-50 и Keltan®512 показывает, что наибольшей термостабильностью обладает этиленпропиленовый каучук марки Keltan®512 содержащий антиоксидант (рис. 1, 2). Сравнивая кривые потери массы образцов с антиоксидантом и без него, можно заметить плавность перехода, кривой, т. е. у образцов серийного производства потеря массы происходит медленнее, чем у образцов без антиоксидантов. Это говорит нам о важности подбора антиоксидантов, стабилизаторов при создании покрытий, эксплуатируемых в условиях атмосферы Земли, и космического пространства.

Связанный ИК-спектр на 24,776 мин имеет четко выраженный пик в области  $2963\text{ см}^{-1}$ , в отличие от ИК-спектров, представленных на (рис. 5, 7, 8). На всех ИК-спектрах присутствует пик в области  $1640\text{ см}^{-1}$ , данный пик указывает на соединения, имеющие в своём составе концевую винильную группу ( $\text{HRC}=\text{CH}_2$ ), предположительно продукт разложения этилиденнорборнена, который присутствует в этиленпропиленовых каучуках в качестве третьего мономера. Также все представленные на (рис. 5–8) спектры имеют пики в области  $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ , что

соответствует соединениям, имеющим в своём составе С-Н связи, отвечающие валентным колебаниям, что указывает на продукты разложения насыщенных углеводородов.

Образец этиленпропиленового каучука марки Keltan®512 не содержащий антиоксидант, имеет схожую кривую потери массы (рис. 4) с образцом марки СКЭПТ-50, в котором также наблюдаются два пика на кривой Грам-Шмидта, что указывает на химический процесс, проходящий в две стадии с экзотермическим эффектом. Исходя из полученных данных, можно предположить, что показатели термостабильности у Keltan®512 без антиоксиданта и СКЭПТ-50, как с антиоксидантом, так и без него значительно не отличаются.

Исследование термостабильности этиленпропиленовых каучуков методами ТГА и анализа ИК-спектроскопии выделяемых газов после термического разрушения образца позволило определить марку каучука, наиболее пригодной для создания УФ-стойких покрытий. В дальнейшем будет изучена термостабильность УФ-стойких покрытий на основе этиленпропиленового каучука марки Keltan®512 модифицированного химическими методами.

**Библиографические ссылки**

1. Пушница А. С., Ворончихин В. Д. Перспективы применения этилен-пропиленовых каучуков для создания УФ-стойких покрытий // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. научн. конф. (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 162–163.
2. Особенности рецептур резин на основе этилен-пропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения (обзор) / Е. В. Алифанов, А. М. Чайкун, М. А. Венедиктова, И. С. Наумов // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 35–39
3. Гайданин А. Н., Коблов А. Н. Особенности механического поведения резин на основе СКЭПТ при температурах начала деструкции // Каучук и резина. 2000. № 3. 5 с.
4. Генкина Ю. М. Этиленпропиленовые каучуки KELTAN – новые технологии, отвечающие современным требованиям // Каучук и резина. 2010. № 2. С. 8–11.
5. Догадкин Б. А., Донцов А. А., Шершнева В. А. Химия эластомеров. М. : Химия, 1981. 376 с.

**References**

1. Pushnitsa A. S., Voronchikhin V. D. Perspective applications ethylene-propylene rubbers to generate UV-resistant coatings // Reshetnev readings : materials XXII International scientific conference (12–16 November 2018, g. Krasnoyarsk) : in 2 part / edited by Y. Y. Loginova ; Sibgu. Krasnoyarsk, 2018 P. 1. P. 162–163.
2. Features of rubber formulations based on ethylene-propylene rubbers and their use in special-purpose products (review) / E. V. Alifanov, A. M. Chaykun, M. A. Venediktova, I. S. Naumov // Aviation materials and technologies. 2015. № 2. P. 35–39.
3. Gaydanin A. N., Koblov A. N. Features of the mechanical behavior of rubbers based on EPDM at temperatures at the beginning of destruction // Rubber and elastomer. 2000. № 3. 5 p.
4. Genkina Y. M. Ethylenepropilene rubbers KELTAN – new technologies that meet modern requirements // Rubber and elastomer. 2010. № 2. P. 8–11.
5. Dogadkin B. A., Doncov A. A., Shershnev V. A. Himiya elastomerov [Chemistry of elastomers]. Moscow : Himiya, 1981. 376 p.

© Пушница А. С., Ворончихин В. Д.,  
Шалыгина Т. А., 2019



## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ МЕТОДОМ МОНОТОННОГО НАГРЕВА

А. В. Серяков, А. П. Алексеев

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»,  
Российская Федерация, 173021, г. Великий Новгород, ул. Нехинская, 55  
E-mail: seryakovav@yandex.ru

*Представлены результаты исследований методом монотонного нагрева в вакуумном адиабатическом калориметре теплового сопротивления и теплоемкости коротких тепловых труб (ТТ), предназначенных для охлаждения космических аппаратов и спутников с жесткой регламентацией взлетной массы. При малых тепловых нагрузках и линейном во времени росте температуры испарителя в приближении постоянных значений коэффициентов удается решить уравнение теплопроводности при монотонном нагреве. Полученные значения теплового сопротивления ТТ совпадают с опытными значениями, полученными в стационарных условиях, а теплоемкость ТТ равна аддитивной сумме теплоемкостей материалов и теплоносителя. При больших тепловых нагрузках необходимо применять алгоритм численного решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности ТТ, позволяющий разделять вычисления теплопроводности и теплоемкости из-за более быстрой сходимости функционалов теплоемкости по сравнению с функционалами теплопроводности ТТ.*

*Ключевые слова: метод монотонного нагрева ТТ, теплопроводность и теплоемкость, обратная задача теплопроводности, сходимость расчетных функционалов.*

## SHORT HEAT PIPES INVESTIGATION BY THE MONOTONIC HEATING METHOD

A. V. Seryakov, A. P. Alekseev

LLC "RUDETRANSSERVICE"  
55, Nekhinskaya Str., 173021, Veliky Novgorod, Russian Federation  
E-mail: seryakovav@yandex.ru

*The results of thermal resistance and heat capacity investigations by the monotone heating method in vacuum adiabatic calorimeter of short heat pipes (HP's), intended for cooling of spacecraft and satellites with rigid regulation of take-off mass are presented. At low heat loads and the linear in time growth of the evaporator temperature in approximation of coefficients constant values it is possible to solve the equation of thermal conductivity at monotonic heating. The obtained values of the HP's thermal resistance coincide with the experimental values obtained in stationary conditions, and the HP's heat capacity is equal to the additive sum of the heat capacity of materials and coolant. However, with large heat loads on the evaporator it must be applied to the numerical solution of the HP's inverse heat conduction problem, that allows to separate the computation of the thermal conductivity and heat capacity due to the more rapid convergence of the HP's heat capacity functionals compared with functionals of the HP's thermal conductivity.*

*Keywords: method of HP's monotone heating, thermal conductivity and heat capacity, inverse problem of thermal conductivity, convergence of HP's estimated functionals.*

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 надежности систем охлаждения, в которых отсутствуют распределенные подводящие и отводящие линии контурных ТТ.

Для исследования теплового сопротивления и теплоемкости [1; 2], характеризующих внутренние свойства ТТ, включая переменные вихревые течения кон-

денсирующегося пара в паровом канале были изготовлены короткие ТТ с выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лаваля паровым каналом, изображенные на рис. 1.

Все измерения были проведены с двумя ТТ, основная из которых, называемая измерительной, заполнена диэтиловым эфиром, а эталонная, полностью идентичная основной, заполнена осушенным воздухом при давлении 1 бар с температурой точки росы ниже 233,15 К (-40 °С). Коэффициент теплопередачи  $K_{ТТ2}$  второй ТТ не превышает 0,15 % от коэффициента теплопередачи первой (измерительной)  $K_{ТТ1}$  и при измерениях не учитывается. Вторая ТТ, идентичная первой, выполняет опорную функцию при измерениях в дифференциальном режиме толщины пленки жидкого конденсата в первой ТТ [3–5].

Распределение экспериментально заданных значений одномерного температурного поля в ТТ применяют для решения стандартного уравнения теплопроводности следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \frac{1}{R_{\text{ТТ}}(t)} \frac{\partial t(\bar{z}, \tau)}{\partial \bar{z}} = C_{\text{ТТ}}(t) i(\bar{z}, \tau);$$

$$R_{\text{ТТ}}(t) = \frac{L_{\text{ТТ}}}{\lambda(t) F(\bar{z})_{\text{ev}}};$$

$$C_{\text{ТТ}}(t) = \rho_{\text{ТТ}} c_p(t) L_{\text{ТТ}} F(\bar{z}), \quad (1)$$

где  $R_{\text{ТТ}}(t)$  – тепловое сопротивление ТТ, К/Вт;  $C(t)$  – теплоемкость ТТ, Дж/К;  $c_p(t)$  – удельная теплоемкость ТТ, Дж/кг·К;  $\rho_{\text{ТТ}}$  – плотность ТТ, кг/м<sup>3</sup>;  $L_{\text{ТТ}}$  – длина ТТ, м;  $F(\bar{z})$  – площадь поперечного сечения ТТ, м<sup>2</sup>;  $\bar{z} = z / L_{\text{ТТ}}$  – безразмерная координата;  $\lambda(t)$  – коэффициент теплопроводности ТТ, Вт/м·К;  $i$  – скорость роста температуры, К/с. Величину теплового сопротивления в стационарном состоянии определяли по формуле

$$R_{\text{ТТ}}(t) = \frac{T_{\text{ev}} - T_{\text{cond}}}{Q_{\text{ev}}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{ev}}$  – средняя стационарная температура насыщенного рабочей жидкостью сеточного испарителя, К;  $T_{\text{cond}}$  – температура поверхности конденсации ТТ, К;  $Q_{\text{ev}}$  – поступающая в испаритель ТТ тепловая мощность, Вт; Погрешность измерения теплового сопротивления ТТ с помощью калориметра не превышает 1,7 %.

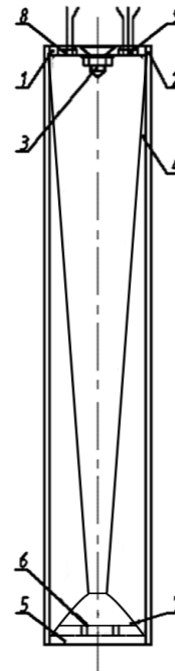


Рис. 1. Схема ТТ:

1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – запорный узел; 4 – капиллярно-пористая вставка; 5 – нижняя крышка; 6 – инжекторные каналы; 7 – капиллярно-пористый испаритель; 8, 9 – емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину пленки жидкого конденсата. В качестве рабочей жидкости применен эфир диэтиловый  $C_4H_{10}O$  с температурой кипения при атмосферном давлении  $T_B = 308,65$  К (35,5 °С), критические параметры  $T_C = 466,55$  К (193,4°С),  $P_C = 3,61$  МПа

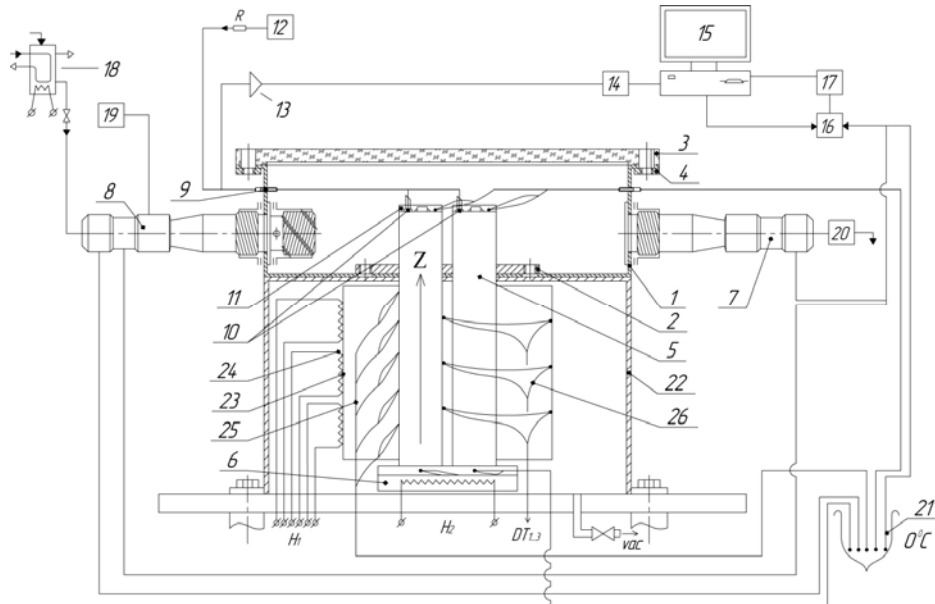


Рис. 2. Схема проведения измерений теплового сопротивления и теплоемкости коротких ТТ в вакуумном адиабатическом калориметре:

1 – вихревой проточный калориметр; 2 – фланец крепления ТТ; 3 – стеклянная крышка; 4 – крепление крышки; 5 – опорная ТТ; 6 – плоский резистивный нагреватель; 7 – сливной штуцер калориметра; 8 – входной штуцер калориметра; 9 – герметичный ввод измерительных проводов; 10 – емкостные датчики для измерения толщины пленки жидкого конденсата; 11 – измерительный и эталонный генераторы, расположенные на верхних торцевых крышках ТТ; 12 – внешний цифровой генератор; 13 – усилитель мощности; 14 – цифровой осциллограф; 15 – компьютер; 16 – управляемый переключатель; 17 – цифровой вольтметр; 18 – сосуд постоянного напора воды; 19 – генератор пузырьков воздуха; 20 – расходомер; 21 – сосуд Дьюара; 22 – вакуумная камера; 23 – адиабатическая оболочка; 24 – охранные нагреватели; 25 – дифференциальные термометры измерения поверхностной температуры ТТ; 26 – дифференциальные термометры адиабатической системы ТТ

Результаты сопоставления экспериментальных значений теплового сопротивления  $R_{ТТ}$ , полученных при малых тепловых нагрузках в стационарных условиях по формуле (2) с полученными методом монотонного линейного во времени нагрева испарителей ТТ со скоростью  $3 \cdot 10^{-3}$  K/s с использованием уравнения теплопроводности (1) с измеренным распределением температуры вдоль продольной оси ТТ показывают их тождественность.

При больших тепловых нагрузках на испаритель ТТ необходимо применять разработанный алгоритм численного решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности (ОЗТ), позволяющий разделить вычисления теплопроводности и теплоемкости из-за более быстрой сходимости пропорциональных  $i$  расчетных функционалов теплоемкости по сравнению с пропорциональными разностям температур  $\Delta t$  функционалами теплопроводности ТТ.

#### Библиографические ссылки

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. : Наука 1964. 488 с.
2. Платунов Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л. : Энергия. 1973. 144 с.
3. 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. 2018. Vol. 7, № 1. P. 48–61.
4. Seryakov A. V. Numerical modeling of the vapour vortex // Journal of the high energy physics, gravitation. 2019. № 5. P. 218–234.
5. 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. Vol. 140. P. 243–259.

#### References

1. Carslow G., Jaeger D. Thermal conductivity of solids. Moscow : Science. 1964. 488 p.
2. Platunov E. S. Teplofizicheskie izmereniya v monotonnom rezhime. L. : Energy. 1973. 144 p.
3. 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. 2018. Vol. 7, № 1. P. 48–61.
4. Seryakov A. V. Numerical modeling of the vapour vortex // Journal of the high energy physics, gravitation. 2019. № 5. P. 218–234.
5. 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. Vol. 140. P. 243–259.

© Серяков А. В., Алексеев А. П., 2019

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА  
СВЕТОВЫХ СИГНАЛОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ  
ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ\***

А. С. Толмачев, П. Е. Кошелев, А. А. Юев, Д. А. Сандул, П. И. Земцова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1  
\*E-mail: pifonepaf@gmail.com

*В настоящее время повсеместно применяются системы технического зрения, решая такие задачи как: поиск и отслеживание объекта, фильтрация или комплексирование изображений, подобные системы позволяют по-новому взглянуть на задачу мониторинга исполнительных устройств при разработке технологичных и совершенствуемых систем корректировки формы отражающей поверхности сетеполотна рефлекторов.*

*Ключевые слова: система технического зрения, мониторинг, машинное обучение, крупногабаритные космические трансформируемые антенны, обработка видеопотока в реальном времени.*

**DEVELOPMENT OF A COMPUTER VISION SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYSIS  
OF LIGHT SIGNALS OF EXECUTIVE DEVICES OF LARGE TRANSFORMED STRUCTURES**

A. S. Tolmachev, P. E. Koshelev, A. A. Yuev, D. A. Sandul, P. I. Zemtsova

Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinova  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation  
\*E-mail: pifonepaf@gmail.com

*Currently systems of computer vision are widely used solving such tasks as object search and tracking, image filtering and aggregation, such systems make it possible to take a different look at the task of monitoring executive devices when developing technologically of the reflective surface of a network tissue of reflectors.*

*Keyword: system of computer vision, monitoring, machine learning, the space-based large transformed antenna, real-time object detection.*

При разработке большинства космических аппаратов отдельное внимание уделяется контролю и мониторингу исполнительных устройств, так же важно учитывать, что не всегда возможно реализовать проводную систему для решения данной задачи [1]. С помощью системы технического зрения и дополнительных модулей, которые формируют необходимый световой сигнал, разработка беспроводной системы мониторинга становится возможным.

Для получения информации о состоянии устройств необходимо распознать и проанализировать ряд световых сигналов, генерируемых светодиодами. Совокупность этих сигналов после анализа системой передаст информацию о номере устройства и его состоянии, в случае нарушения нормальной работы сигнал включает в себя номер ошибки, заранее заложенный в систему программой.

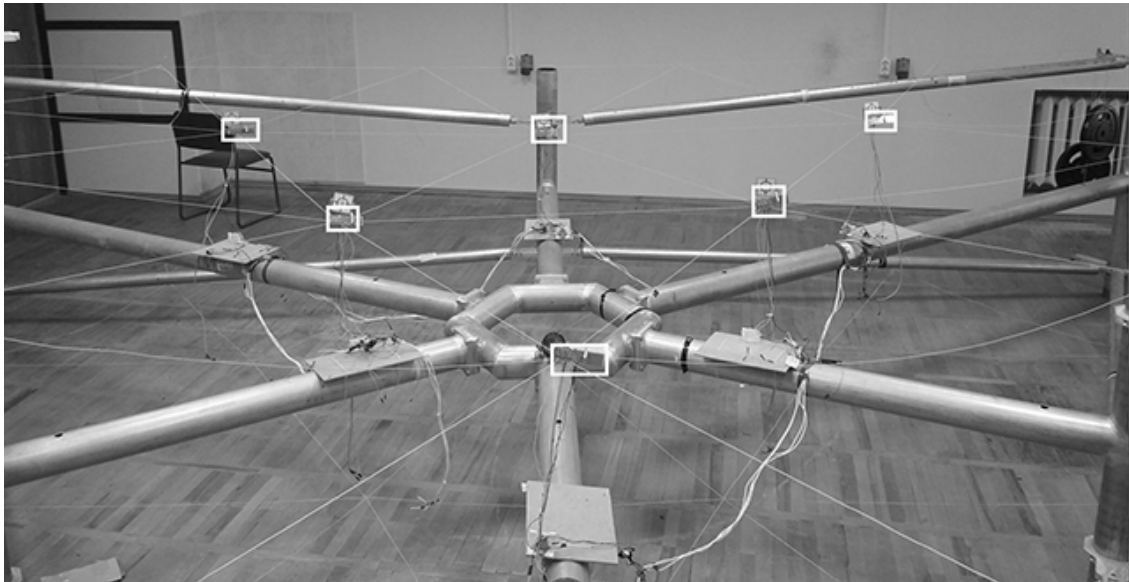
Модуль для генерации визуальных сигналов представляет собой шесть светодиодов, расположенных горизонтально, и светорассеиватель зеленого

цвета, необходимый для более точного распознавания ввиду возможных помех, создаваемых небесными телами и световыми бликами на корпусе космического аппарата. Светорассеиватель позволит проводить поиск сигнала не только по яркости и заранее известным координатам необходимого модуля, но также и по цвету [2; 3]. Для начала передачи информации модуль визуальных сигналов генерирует команду СТАРТ, а именно подачу на светодиод напряжения, достаточного для создания визуального сигнала, в течение четырех секунд.

При анализе сигнала сформированного путем фильтрации видеопотока, получаемого с камеры, каждая секунда является 0 или 1 что равно одному биту информации, соответственно команда «СТАРТ» задается последовательностью «1111» а команда «СТОП» равна «0000».

Число битов в сообщении может изменяться в случае увеличения количества команд, передаваемых в систему [4].

\*Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0165 от 26.09.2017, соглашение ЭБ 075-02-2018-1074 от 15.11.2018. Уникальный идентификатор RFMEFI57417X0165: «Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов».



Пример работы системы технического зрения

В предлагаемом решении техническое зрение так же используется для распознавания модуля визуальных сигналов.

Пример работы программы представлен на рисунке.

Координаты областей изображения, в которых находятся модули, обрабатываются системой, и при получении сигналов отпадает необходимость идентифицировать устройства путем передачи сообщения, так как система каждому модулю присвоит идентификатор исходя из координат на кадре.

Таким образом, разработанная система мониторинга не только позволяет отказаться от методов, включающих проводное соединение, но и улучшать массогабаритные характеристики конструкции космических аппаратов. Эти возможности являются особенно важным в условиях космического пространства [5].

#### Библиографические ссылки

1. Талалаев А. А., Фраленко В. П., Хачумов В. М. Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата. 2015. С. 25–30.

2. Дэвид Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение, современный подход : пер. с англ. М. : Вильямс, 2018.

3. Николай Красильников: Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. СПб. : BHV, 2011.

4. Стивен Смит: Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. М. : ДМК-Пресс, 2018.

5. Boreysho A. S., Kochin L. B., Strakhov S. Yu. System for transmitting energy and information using laser radiation for control of the shape of large space-based antennas. 2016 International conference Laser Optics, LO 2016, St. Petersburg, 2016.

#### References

1. Talalaev A. A., Fralenko V. P., Khachumov V. M. Overview of standards and the concept of building tools for monitoring, control and diagnostics of the spacecraft. 2015. P. 25–30.

2. David Forsyth, Jean Pons Computer vision, a modern approach. Per. from English. Moscow : Williams Publishing House, 2018.

3. Nikolai Krasilnikov: Digital processing of 2D and 3D images Editor. SPb. : BHV, 2011.

4. Stephen Smith: Digital Signal Processing. A practical guide for engineers and scientists. Moscow : Publisher: DMK-Press, 2018.

5. Boreysho A. S., Kochin L. B., Strakhov S. Yu. System for transmitting energy and information using laser radiation for control of the shape of large space-based antennas. 2016 International conference Laser Optics, LO 2016, St. Petersburg, 2016.

© Толмачев А. С., Кошелев П. Е., Юев А. А., Сандул Д. А., Земцова П. И., 2019

## СРАВНЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

С. С. Тюпкин, Р. Г. Батрутдинов, И. В. Обверткин, А. Ю. Власов

ООО «Интрум»

Российская Федерация, 660013, г. Красноярск, ул. Томская, 4, стр. 7

\*E-mail: tyupkins@yandex.ru

*Изготовление крупногабаритного радиопрозрачного изделия (РПИ) позволит защитить от внешних воздействий антенны большего размера и больше радиолокационного оборудования. Представлены принципы разработки и изготовления крупногабаритных радиопрозрачных изделий.*

*Ключевые слова: радиопрозрачность, крупногабаритное изделие, конструкционный пенопласт, технологии.*

## COMPARISON OF STRUCTURAL MATERIALS FOR THE CHOICE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY OF LARGE-SIZE RADIO-TRANSPARENT PRODUCTS

S. S. Tyupkin, R. G. Batrutdinov, I. V. Obvertkin, A. Y. Vlasov

“Intrum” Ltd

4, Tomskaya Str., Krasnoyarsk, 660013, Russian Federation

\*E-mail: tyupkins@yandex.ru

*Production of large-size RTP, will protect from external influences, larger antennas and more radar equipment. The principles of development and production of large-size radio-transparent products are presented.*

*Keywords: radioparency, large-size, structural foam, technology.*

При проектировании радиопрозрачного укрытия нужно учитывать оптимальную форму поверхности и конструкцию стенки, так как данные параметры влияют на радиотехнические характеристики антенны. Также важным фактором являются материалы и технология изготовления РПИ [1].

Сущность метода изготовления РПИ заключается в последовательном формовании на формообразующую оснастку многослойной конструкции стенки с использованием трехмерной стеклоткани (рис. 1) либо эпоксидной пены (рис. 2) [2].

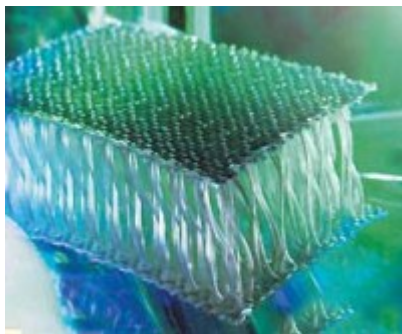


Рис. 1. Пример трехмерной стеклоткани

При изготовлении крупногабаритного РПИ использование указанных материалов вызовет некоторые затруднения и даже невозможность реализации проекта. В обоих случаях будет использоваться метод

вакуумного/ ручного формования, что будет крайне нетехнологично при изготовлении изделия таких габаритов, также будет вызывать массу неудобств на этапе формования стеклоткани и слесарных работ. Использование эпоксидной пены при изготовлении крупногабаритных изделий можно исключить, так как суть метода переработки пены заключается в использовании оснасток с позитивной (пуансон) и негативной (матрица) поверхностями, что вызовет проблемы на этапе стыковки оснасток. Тот факт, что пена будет использоваться в толстостенном изделии, вызывает опасение возникновения экзотермической реакции при изготовлении изделия [3–5].



Рис. 2. Пример эпоксидной пены

Использования конструкционного пенопласта (рис. 3) позволит, хоть и не в полной мере, но значи-

тельно облегчить изготовление крупногабаритного РПИ. В таком случае будет использоваться вакуумная инфузия. Отличительной особенностью будет появление операции термоформовки пенопласта. Суть данной операции заключается в том, что помещён под вакуум на технологическую оснастку для придания ему формы изделия с помощью термоформовки [6].

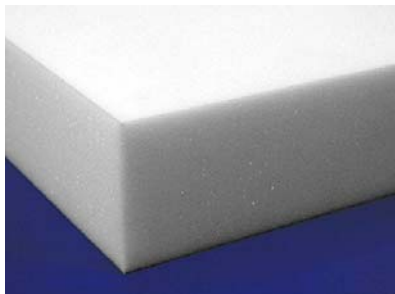


Рис. 3. Пример конструкционного пенопласта

#### Библиографические ссылки

1. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков : научное издание / И. Г. Гуртовник, В. И. Соколов, Н. Н. Трофимов, С. Г. Шалгунов. М. : Мир, 2002. 368 с.
2. Matthews F. L., Rawlings R. D. Composite materials. Engineering and science. CRC Press, Woodhead Publishing, 1999. 480 p.
3. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sicom.in.com/datasheets/product-pdf188.pdf> (дата обращения: 10.09.2019).
4. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/13936112/manual-for-parabeamr-3d-glass-fabric-in-double-romar-voss-bv> (дата обращения: 10.09.2019).

read/13936112/manual-for-parabeamr-3d-glass-fabric-in-double-romar-voss-bv (дата обращения: 10.09.2019).

5. Карпов Я. С., Ивановская О. В. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия : учеб. пособие. Харьков : ХАИ, 2001. 152 с.
6. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: [https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-T92-E\\_1106.pdf](https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-T92-E_1106.pdf) (дата обращения: 10.09.2019).

#### References

1. Radioprozrachnye izdelija iz stekloplastikov : nauchnoe izdanie / I. G. Gurtovnik, V. I. Sokolov, N. N. Trofimov, S. G. Shalgunov. M. : Mir, 2002. 368 p.
2. Matthews F. L., Rawlings R. D. Composite materials. Engineering and science. CRC Press, Woodhead Publishing, 1999. 480 p.
3. Electronic textbook StatSoft [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.sicom.in.com/datasheets/product-pdf188.pdf> (access: 10.09.2019).
4. Electronic textbook StatSoft [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/13936112/manual-for-parabeamr-3d-glass-fabric-in-double-romar-voss-bv> (access: 10.09.2019).
5. Karpov Ja. S., Ivanovskaja O. V. Kompozitsionnye materialy: komponenty, struktura, pererabotka v izdelija : Uchebnoe posobie. Har'kov : HAI, 2001. 152 p.
6. Electronic textbook StatSoft [Elektronnyj resurs]. URL: [https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-T92-E\\_1106.pdf](https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-T92-E_1106.pdf) (access: 10.09.2019).

© Тюпкин С. С., Батрутдинов Р. Г., Обверткин И. В., Власов А. Ю., 2019

УДК 629.7.018.4:534.1

## ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В. И. Халиманович<sup>1</sup>, В. А. Бернс<sup>2,3\*</sup>, Д. А. Красноруцкий<sup>2,3</sup>, В. Н. Лушин<sup>3</sup>, Д. А. Маринин<sup>1</sup>

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

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

<sup>2</sup>ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина»

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

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет

Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

\*E-mail: v.berns@yandex.ru

*Изложены проблемы экспериментального модального анализа крупногабаритных трансформируемых космических конструкций в лабораторных условиях.*

*Ключевые слова: крупногабаритные конструкции, расчетно-экспериментальный модальный анализ, составные части конструкции, математическая модель, коррекция и синтез математических моделей.*

## PROBLEMS OF EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF LARGE-SIZED TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES

V. I. Halimanovich<sup>1</sup>, V. A. Berns<sup>2,3\*</sup>, D. A. Krasnorutskiy<sup>2,3</sup>, V. N. Luchin<sup>3</sup>, D. A. Marinin<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>FSUE “Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin”

21, Polzunov Str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University

20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

\*E-mail: v.berns@yandex.ru

*The presented problems of experimental modal analysis of large-sized transformable space structures in laboratory conditions.*

*Keywords: large-sized structures, computational-experimental modal analysis, structure component parts, mathematical model, correction and synthesis of mathematical models.*

**Введение.** Результаты модальных испытаний – собственные частоты и формы колебаний, обобщённые массы и коэффициенты демпфирования используются для коррекции математических моделей космических аппаратов [1]. Эти модели необходимы для обеспечения управляемости и нормального функционирования космической техники. Экспериментальный модальный анализ крупногабаритных трансформируемых космических конструкций (КТКК) связан с рядом проблем: большие габариты и сложная пространственная конфигурация конструкций требуют испытательные лаборатории соответствующих размеров и многоканальные системы возбуждения и измерения колебаний; для развёртывания таких конструкций в поле сил тяжести необходимы специальные поддерживающие устройства; низкие собственные частоты колебаний затрудняют использование датчиков ускорений и являются причиной значительного влияния воздушной среды на определяемые модальные характеристики [2]. Для решения задачи модаль-

ного анализа КТКК в настоящей работе предлагается расчетно-экспериментальный метод.

**Методология.** Крупногабаритная трансформируемая конструкция разделяется на некоторые составные части. Например, такими частями для зонтичных антенн могут являться отдельно штанга и отдельно рефлектор. Проводятся модальные испытания всех составных частей, по результатам которых корректируются их расчётные модели. Каждая из составных частей имеет меньшие размеры и более простую конфигурацию, чем исходная конструкция. Кроме того, собственные частоты составных частей значительно выше частот полной конструкции. Это позволяет использовать традиционные методики и средства экспериментального модального анализа и упрощает процедуру его проведения.

В модальных испытаниях составных частей КТКК может возникнуть необходимость компенсации сил гравитации. В статье описан способ активной компенсации сил гравитации методом приложения к локаль-



ным точкам конструкции сил, равных весу фрагментов объекта испытаний и направленных противоположно силам гравитации. Для многоточечной компенсации сил гравитации применяются прецизионные электромеханические устройства, позволяющие при движении точек приложения сил (локальных центров масс) обеспечить постоянство значения и сохранить направление компенсационного воздействия за счёт измерения перемещений точек обезвешиваемого фрагмента, расчёта параметров силового воздействия и создания требуемых комбинаций сил исполнительными механизмами в реальном времени. Достоинством предлагаемого решения является то, что такая система компенсации сил гравитации не вносит искажений ни в инерционные, ни в жесткостные характеристики объекта испытаний. Описываемые устройства позволяют совмещать в себе функции компенсации сил гравитации и функции многоточечного возбуждения колебаний объекта испытаний с измерением параметров движения точек приложения сил.

Скорректированные расчётные модели составных частей синтезируются в математическую модель полной конструкции, и производится расчёт её модальных параметров. Часто коррекция расчётных моделей производится изменением механических характеристик материалов и упруго-массовых характеристик элементов объекта исследований [3–5]. Результат такого подхода зачастую зависит от предпочтений проводящего коррекцию специалиста. В настоящей работе разработан способ коррекции непосредственно матриц жёсткости составных частей крупногабаритной конструкции. Поскольку условия закрепления этих частей на время испытаний могут не соответствовать условиям их закрепления в составе полной конструкции, то предложен способ освобождения скорректированных расчётных моделей от любых граничных условий [6].

Наличие воздушной среды может оказать значительное влияние на собственные частоты и демпфирование колебаний космических конструкций. Экспериментальные исследования этого влияния предполагают выполнение значительного объёма работ, так как изучаемое явление зависит от большого числа факторов. К ним относятся частота колебаний, амплитуда колебаний, габариты изделия (масштабный фактор), форма вида в плане и конфигурация торцевых частей, особенности конструкции изделия и качество его покрытия и т. д. Проведение полного цикла испытаний на полноразмерных макетах типовых элементов конструкций и изделий потребует значительных материальных и временных затрат. Поэтому в настоящей работе предложено делать оценки влияния воздуха на динамические характеристики конструкций по результатам испытаний их масштабных моделей.

Синтез расчётных моделей составных частей в расчётную модель исходной КТКК производится по правилам, разработанным в методе конечных элементов.

Эффективность метода проиллюстрирована на примере макета зонтичной антенны космического аппарата.

**Выводы.** Разработанный расчётно-экспериментальный метод позволяет существенно упростить определение динамических характеристик крупногабаритных трансформируемых конструкций по сравнению с методом экспериментального модального анализа.

#### Библиографические ссылки

1. Межин В. С., Обухов В. В. Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 1 (4). С. 86–91.
2. Аминов В. Р. Определение влияния воздушной среды на колебания космической конструкции при наземных испытаниях // Косм. исследования. 1999. Т. 37, № 5. С. 532–537.
3. Кузнецов О. А., Смыслов В. И. Опыт корректирования расчётной динамической схемы по результатам резонансных испытаний // Уч. зап. ЦАГИ. 1979. Т. 10, № 6. С. 99–112.
4. Finite Element Model Updating of Satellite Sailboard Based on Sensitivity Analysis [Электронный ресурс] / L. Haitao, W. Wei, F. Jia, et al. // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Article ID 4547632. 12 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/4547632> (дата обращения: 06.09.2019).
5. A model-updating approach based on the component mode synthesis method and perturbation analysis [Электронный ресурс] / T. Wang, H. He, W. Yan, et al. // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 433. P. 349–365. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.07.026> (дата обращения: 06.09.2019).
6. Метод освобождения динамической расчётной модели летательного аппарата / Д. А. Красноуцкий, В. А. Бернс, П. А. Лакиза и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2019. Т. 21, № 1. С. 37–44.

#### References

1. Mezhin V. S., Obukhov V. V. *Praktika primeneniya modal'nykh ispytaniy dlya selei verifikatsii konechno-elementnykh modelei konstruyktsii izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki* [The practice of using modal test to verify finite element models of rocket and space hardware]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014. № 1. P. 86–91 (In Russ.).
2. Aminov V. R. *Opreделение vliyaniya vozduшной sredy na kolebaniya kosmicheskoy konstrukttsii pri nazemnykh ispytaniyakh* [Determination of air influence on space structure oscillation in ground testing] // *Kosm. issledovaniya*. 1999. Vol. 37, № 5. P. 532–537 (In Russ.).
3. Kuznetsov O. A., Smyslov V. I. *Opyt korrektirovaniya raschetnoy dinamicheskoy skhemy po rezul'tatam rezonansnykh ispytaniy* [The experience of adjusting the calculated dynamic circuit according to the results of resonance tests] // *Uch. zapiski TsAGI*. 1979. Vol. 10, № 6. P. 99–112.
4. Haitao L., Wei W., Jia F., Lichuang J., Finite Element Model Updating of Satellite Sailboard Based on Sensitivity Analysis. *Shock and Vibration*. 2019.

Vol. 2019, article ID 4547632, 12 p. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/4547632> (access: 06.09.2019).

5. Wang T., He H., Yan W., Chen G.P., A model-updating approach based on the component mode synthesis method and perturbation analysis [Electronic resource] // *Journal of Sound and Vibration*. 2018. Vol. 433. P. 349–365. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.07.026> (access: 06.09.2019).

6. Krasnorutskiy D. A., Berns V. A., Lakiza P. A., Levin V. E. *Metod osvobozhdeniya dinamicheskoy*

*raschetnoy modeli letatel'nogo apparata* [Method of freeing a fixed dynamic model of an aircraft] // *Izv. Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2019. Vol. 21, № 1. P. 37–44 (In Russ.).

© Халиманович В. И., Бернс В. А.,  
Красноруцкий Д. А., Лушин В. Н.,  
Маринин Д. А., 2019

УДК 629

**КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ, ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ ВСЛЕДСТВИЕ ДИФФУЗИОННОЙ АДГЕЗИИ ЭПОКСИДНОГО АППРЕТА УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН И ПОЛИУРЕТАНОВОЙ МАТРИЦЫ\***

Т. А. Шалыгина<sup>1,2\*</sup>, С. Ю. Воронина<sup>1,2</sup>, А. Ю. Власов<sup>1</sup>, К. А. Пасечник<sup>1,2</sup>, И. В. Обверткин<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. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

\*E-mail: leonova.ta@inbox.ru

*С помощью дифференциально сканирующей калориметрии с температурной модуляцией исследованы изменения структуры полиуретановой матрицы при армировании углеволокном. Данные изменения привели к увеличению доли жестких сегментов и проявлению эффекта памяти тройной формы, используемого для изготовления трансформируемых конструкций космического назначения.*

*Ключевые слова: эффект памяти тройной формы, полиуретан, дифференциально сканирующая калориметрия, температурная модуляция, механизм диффузионной адгезии.*

**CALORIMETRIC RESEARCHES WITH TEMPERATURE MODULATION OF THE TRANSITION LAYER FORMED BY DIFFUSION ADHESION OF EPOXY CARBON FIBER AND POLYURETHANE MATRIX**

T. A. Shalygina<sup>1,2\*</sup>, S. Yu. Voronina<sup>1,2</sup>, A. Yu. Vlasov<sup>1</sup>, K. A. Pasechnik<sup>1,2</sup>, I. V. Obvertkin<sup>1,2</sup>

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>FRC "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences"

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036. Russian Federation

\*E-mail: leonova.ta@inbox.ru

*Using differential scanning calorimetry with temperature modulation, structural changes in the polyurethane matrix during carbon fiber reinforcement were studied. These changes have led to an increase in the share of hard segments and the manifestation of the triple-shaped memory effect used for the manufacture of transformable space structures.*

*Keywords: triple-shaped memory effect, polyurethane, differential scanning calorimetry, temperature modulation, diffusion adhesion mechanism.*

Эффект памяти тройной формы (ЭПТФ) полимерных материалов – это частный случай классического эффекта памяти двойной формы (ЭПФ), описываемый возможностью запоминать дополнительную временную форму. Полимерные материалы с помощью ЭПТФ могут не только восстанавливать свою исходную форму посредством температурного воздействия, но и совершать двухуровневые трансформации при различных значениях температур. Благодаря ЭПТФ можно решать более сложные задачи различных областей науки и техники, например, для изготовления некоторых элементов трансформируемых конструкций, космического назначения. Однако появление ЭПТФ требует наличия определенного соотношения в структуре материала высокотемпературных (жестких) и низкотемпературных (гибких) сегментов. Так как гибкие и жесткие блоки отвечают различным значе-

ниям температурного перехода, то формирование промежуточной формы производится при температуре выше высокотемпературного перехода жестких блоков, а конечной – при температуре чуть выше низкотемпературного перехода гибких блоков [1].

При реализации промежуточной формы в процесс деформирования вовлечены и гибкие и жесткие блоки, находящиеся в высокоэластическом состоянии. После охлаждения до значения низкотемпературного перехода, жесткие блоки переходят в стеклообразное состояние, фиксируя («запоминая») часть деформации. При повторном деформировании, но уже с большим значением напряжения, гибких блоков, находящихся все еще в высокоэластическом состоянии, реализуется конечная форма, которая фиксируется путем охлаждения образца до комнатной температуры.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90166.

Поэтому, именно жесткие сегменты отвечают за реализацию промежуточной формы, если их будет недостаточное количество, то материал не способен «запомнить» дополнительную форму.

Наличие и гибких и жестких сегментов наблюдается у полиуретана, который иногда называют своеобразным «раствором» уретановых (жестких) групп в полиэфирных (гибких) блоках. Для возникновения ЭПТФ у полиуретана необходим поиск методов повышения доли жестких блоков, минуя химические методы модификации его компонент. Как известно, для изготовления деталей различных конструкций, полиуретан армируют несколькими слоями ткани на основе аппретированных углеродных волокон, для увеличения модуля упругости. Предварительные исследования показали, что между эпоксидным аппретом углеродных волокон и полиуретановым связующим может протекать механизм диффузионной адгезии, которому ранее не придавали должного внимания при изготовлении углепластиков. Посредством протекания данного механизма может быть сформирован переходной слой с повышенной плотностью упаковки, тем самым смещая соотношение гибких и жестких блоков в сторону последних, способствуя появлению ЭПТФ.

Для подтверждения вышеизложенного предположения были проведены калориметрические исследования образцов исходного полиуретана и армированной полиуретановой матрицы тремя слоями биаксиальной ткани на основе аппретированных углеродных волокон, полученных в одинаковых условиях отверждения. В ходе исследования были проанализированы сигналы, полученные с помощью МДСК, как от первого нагрева, когда структура полиуретана характеризовалась высокой степенью фазового разделения, так и от второго нагрева. Режим модуляции теплового потока позволяет разделить сигнал на обратимые и необратимые составляющие. Кривая обратимого теплового потока, отражающая ход изменения теплоемкости, может быть преобразована в график зависимости теплоемкости  $C_p$  и ее первой производной  $dC_p/dT$  от температуры. Значения максимумов пиков на кривой  $dC_p/dT$  можно считать температурами стеклования ( $T_g$ ), поскольку соответствуют температурам, при которых скорость изменения теплоемкости (обратимого теплового потока) имеет локальный максимум [2]. Таким образом, на кривой температурной зависимости  $dC_p/dT$ , полученной при первом нагреве, для образца неармированного полиуретана наблюдаются два максимума, характеризующие температурные переходы для гибких сложноэфирных групп при 42 °С и при 79 °С для жестких уретановых групп. Сравнение площадей пиков указывает на преобладание гибких сегментов. Кроме этого можно наблюдать достаточной широкий эндотермический пик с минимумом при ≈65 °С на кривой необратимого теплового потока исследуемых образцов.

Наличие такого эндотермического пика часто связывают с разрушением водородных связей между уретановыми и полиэфирными блоками, образовавшихся в результате отверждения образца [3]. Разрыв водо-

родных связей между гибкими и жесткими блоками позволил совершить перегруппировку сегментов при дальнейшем нагревании до 115 °С, тем самым понизить степень фазового разделения и повысить степень взаимопроникновения.

Поэтому при втором нагреве на кривой  $dC_p/dT$  от температуры наблюдается только один пик с максимумом при 60 °С, вызванный суперпозицией индивидуальных переходов участвующих сегментов.

По результатам МДСК образцов армированного полиуретана наблюдается изменение структуры полиуретанового связующего, характеризующееся возникновением на кривой температурной зависимости  $dC_p/dT$  третьего пика с максимумом при 23 °С, уменьшением площади пика от сложноэфирных групп с тепловым переходом при 42 °С, а также увеличением доли высокотемпературных сегментов и сдвиг значения теплового перехода данных сегментов в низкотемпературную область до 70 °С. Можно предположить, что процесс диффузионной адгезии был осуществлен только с участием более подвижных сегментов сложноэфирных групп полиуретановой матрицы. Часть из них, оказалась «зажатой» молекулярными сегментами эпоксидного аппрета, что вызвало уменьшение их подвижности за счет чисто физического ограничения. На сегменты алифатических сложных полиэфиров, находящихся на границе раздела, но не вовлеченных в диффузионный процесс, оказали влияние алкильные заместители сегментов макроцепей эпоксидного аппрета, стерически экранируя и препятствуя их взаимодействию с уретановыми группами. Это привело к появлению пика с максимумом при 23 °С. При втором нагреве из-за увеличения степени взаимопроникновения гибких и жестких блоков также наблюдается суммарный тепловой переход с максимумом при 57 °С и малоинтенсивный пик от теплового перехода свободных сложноэфирных групп с максимумом при 21 °С.

Таким образом, было показано, что с помощью температурной модуляции дифференциального сканирующего калориметра возможно исследование изменения структуры полиуретана при его армировании. Было показано, что первый нагрев, когда структура полиуретана характеризуется высокой степенью фазового разделения, можно получить индивидуальные сигналы как от жестких уретановых, так и от гибких сложноэфирных групп.

Установлено, что армирование полиуретана приводит к увеличению площади пика от жестких сегментов и сдвиг его максимума в низкотемпературную область до 70 °С, а также к появлению третьего пика с максимумом при 23 °С от свободных сложноэфирных групп.

#### Библиографические ссылки

1. Xiaoying Ji, Dayong Chen, Yu Zheng, Jiabin Shen, Shaoyun Guo, Eileen Harkin-Jones Multilayered assembly of poly(vinylidene fluoride) and poly (methyl methacrylate) for achieving multi-shape memory effects // Chemical Engineering Journal. 2019. № 362. P. 190–198.

2. Masson J. F., Polomark G. M. *Thermochimica Acta*. 2011. № 374. P. 105–114.

3. Бюист Дж. М. Композиционные материалы на основе полиуретанов : пер. с англ. / под ред. Ф. А. Шутова. М. : Химия, 1982. 240 с.

#### References

1. Xiaoying Ji, Dayong Chen, Yu Zheng, Jiabin Shen, Shaoyun Guo, Eileen Harkin-Jones Multilayered assembly of poly(vinylidene fluoride) and poly(methyl

methacrylate) for achieving multi-shape memory effects // *Chemical Engineering Journal*. 2019. № 362. P. 190–198.

2. Masson J. F., Polomark G. M. *Thermochimica Acta*. 2011. № 374. P. 105–114.

3. Buist J. M. *Kompozitsionnye materialy na osnove poliuretanov* : Per. S angl. / Pod red. F. A. Shutova. Moscow : Khimiya, 1982. 240 p.

© Шалыгина Т. А., Воронина С. Ю., Власов А. Ю.,  
Пасечник К. А., Обверткин И. В., 2019

УДК 629.7.02

## РАЗРАБОТКА БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

А. А. Юев\*, А. Д. Ширшов, Е. И. Евстигнеева, П. Е. Кошелев, Ю. В. Коноплев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

\*E-mail: betterthanjms@gmail.com

*Современные темпы развития технических устройств задают новые направления для разработок, в связи с этим возникает необходимость в проектировании более совершенных и универсальных систем контроля, способных упрощать процессы реализации и отладки различных устройств.*

*Ключевые слова: микроконтроллер, системы мониторинга, электронные устройства, аналого-цифровой преобразователь, техническая система, беспроводная передача данных.*

## DEVELOPMENT OF THE WIRELESS SYSTEM OF CONTROL AND MONITORING FOR ELECTRONIC SYSTEM

A. A. Yuev\*, A. D. Shirshov, E. I. Evstigneeva, P. E. Koshelev, Y. V. Konoplev

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinova  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation

\*E-mail: betterthanjms@gmail.com

*Modern pace of technical devices development set out new research and development trends, which calls for designing more sophisticated and comprehensive monitoring systems capable of simplifying the process of various devices' implementation and debugging.*

*Keywords: microcontroller, monitoring system, electronic device, analog-to-digital converter, technical system, wireless data transfer.*

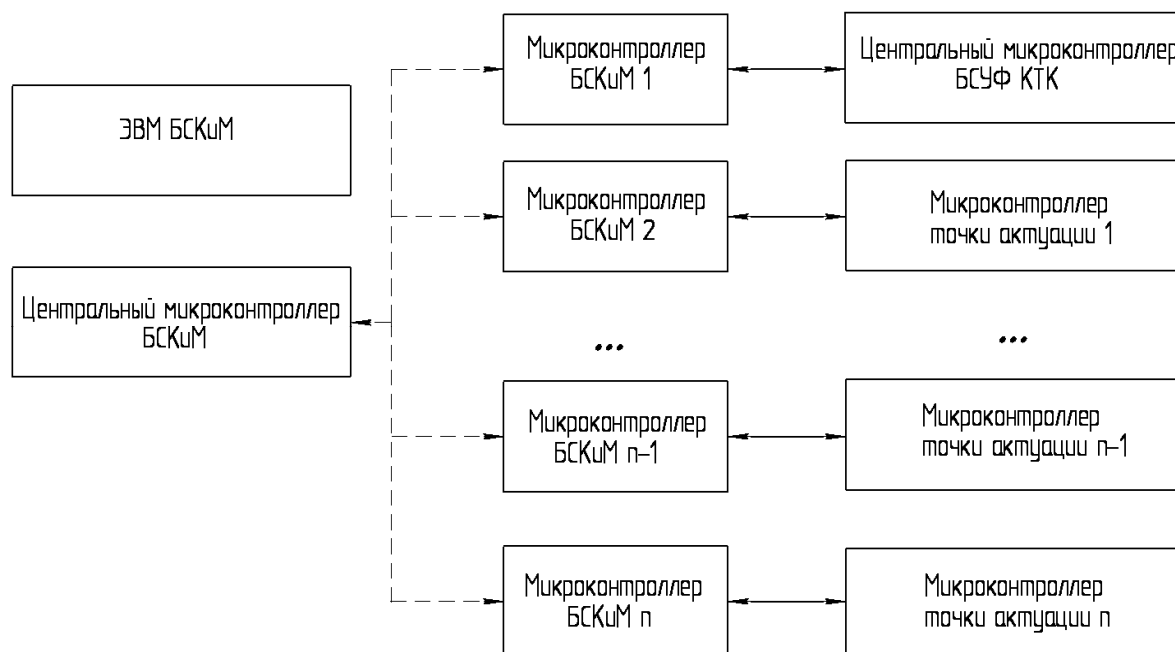
В связи с прогрессированием современных технических систем электронные устройства могут быть более склонны к ошибкам в своей работе, требуя при этом находить новые подходы и методы контроля их функционирования, а также ремонта и отладки. При проектировании новых технических систем возникает необходимость контролировать не только корректность работы всей системы, но и отдельных ее узлов, получая информацию об их состоянии. Возможность воздействовать на каждый из элементов системы напрямую, имитируя подачу команд из других составных частей (модулей) технической системы, может быть полезной в процессе разработки и проведения испытаний. Такой подход позволяет находить ошибки в работе отдельных элементов, без необходимости задействования всей системы.

Подобная система контроля и мониторинга была использована в разработке макетного и экспериментального образцов беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов, проектируемой в БГТУ «ВОЕНМЕХ», как устройство диагностики корректности состояний работы основных составных модулей [1]. Необходимость применения системы контроля и мониторинга обусловлена большим количеством отдельных элементов, информационных устройств для связи между узлами по открытому оптическому кана-

лу и прецизионных приводов, необходимых для изменения формы поверхности радиоотражающего сетеполотна [2]. Разработанная система получила название «Беспроводная система контроля и мониторинга электронных устройств» (БСКиМ), структурная схема которой представлена на рисунке.

Конструктивно, основой данной БСКиМ являются сообщаемые между собой на сверхвысоких частотах по радиоканалам микроконтроллеры, задача которых состоит в подключении к элементам напрямую [3]. Микроконтроллеры принимают и обрабатывают информацию об устройствах, к которым подключаются, получая возможность напрямую влиять на работу точек актуации (Геометрических узлов фронтальной сети, изменяющих свое пространственное положение посредством изменения рабочей длины стягивающих вант и, таким образом, выстраивающих форму радиоотражающей поверхности рефлектора, где корректировка рабочей длины стягивающей ванты обеспечивается работой системы привода, основой которого является актуатор (ЭМИУ)). К данным, которые принимает и обрабатывает БСКиМ относятся:

- напряжение на накопителе;
- напряжение на фотопреобразователе;
- разность координат, поступающая на точку актуации от ЦП;
- работоспособность всех составляющих элементов точки актуации.



Структурная схема беспроводной системы контроля и мониторинга

Данные, полученные системой, посылаются на центральную ЭВМ, где они обрабатываются и визуализируются посредством работы специализированного ПО. Через интерфейс программы можно также посылать команды управления БСКиМ. Опционально, информация может быть собрана на центральном микроконтроллере без передачи на ЭВМ, и использоваться для передачи в другую систему, или для принятия решений о влиянии на работу системы самостоятельно.

Одной из возможных проблем функционирования подобной системы является ненадежность работы радиоканала, которая может привести к искажению информации [4]. Решением проблемы может являться исследование процентов ошибочных передач на большие расстояния и внедрение избыточных кодов (например, код Хемминга) при необходимости исправлять множественные одиночные ошибки [5].

В ходе проектирования и реализации беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых конструкций разработанная БСКиМ позволяет оперативно отработать и отладить техническую систему, с возможностью гибкого воздействия на отдельные узлы. БСКиМ такого рода является самостоятельной, и при небольших изменениях исходного кода программы, может применяться в дальнейшем для других проектов.

#### Библиографические ссылки

1. Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых наземных и космических конструкций с применением прецизионных приводов, уникальный идентификатор RFMEFI57417X0165 / С. А. Матвеев, С. А. Рудыка,

С. Г. Яковенко и др. // Отчет о выполнении ПНИ по этапу 2. СПб., 2019.

2. Передача энергии и информации по оптическому каналу для управления формой космической антенны / Л. Б. Кочин, М. А. Крылова, Д. А. Хромихин и др. // Решетневские чтения : материалы XXI междунар. науч. конф. по физике высоких плотностей энергии. Красноярск, 2017.

3. Гороновский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов. М. : Советское радио, 1977. 608 с.

4. Кочин Л. Б., Симрнов В. В., Страхов С. Ю. Непомышленные помехи и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб. пособие. М. : Балтийский государственный технический университет, 2018. 99 с.

5. Васин В. А., Калмыков В. В., Себекин Ю. Н. Радиосистемы передачи информации : учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия – Телеком, 2005. 472 с.

#### References

1. *Razrabotka besprovodnoi sistemi upravleniya formoy krynogabaritnih transformiruemih nazemnih i kosmicheskikh konstrukciy s primeneniem precizionnih privodod* [Development wireless system control of oversized land and space construction with precision actuators] / S. A. Matveev, S. A. Rudika, C. G. Yakovenko et al. Sint-Peterburg, 2019.

2. *Transmission of energy and information through an optical channel for controlling the shape of a space antenna* / L. B. Kochin, M. A. Krylova, D. A. Khromikhin et al. // *Reshetnevskyie chttenia: Materiyyali XXI mezd. konf. Po phisike visokih plotnostey energii* [Reshetnev readings: materials of the XXI

international scientific. Conference on High Energy Density Physics], Krasnoyarsk, 2017.

3. Goronovski I. S. *Radiotekhnicheskie cepi i signalky* [Radio circuits and signals]. Moscow : Sovetskoe radio publ., 1977. 608 p.

4. Kochin L. B., Smirnov V. V., Strahov S. U. *Neumishlennye pomехи i elektromagnitnaya sovmestimost* [Unintentional interference and electromagnetic compatibility]. Moscow : BSTU publ., 2018. 99 p.

5. Vasin V. A., Kalmikov V. V. Sebekin *Radiosistemy peredachi informacii* [Radio systems of information transfer]. Moscow : Goryachaya linia – telecom publ. 2005. 472 p.

© Юев А. А., Ширшов А. Д.,  
Евстигнеева Е. И., Кошелев П. Е.,  
Коноплев Ю. В., 2019





**Секция**

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО  
И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Р. Н. Агаев, Н. З. Агаев, Д. А. Осипов, А. В. Коротеев, А. Г. Ганжин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»  
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а  
E-mail: nurad@yandex.ru

*Для того чтобы стратегический беспилотный летательный аппарат был способен выполнять лежащие перед ним задачи, он должен быть оснащен соответствующей силовой установкой, которая должна обладать потребными тяговыми характеристиками.*

*Ключевые слова: силовая установка, проектирование, тяга, стратегический беспилотный летательный аппарат.*

**DESIGNING THE POWER PLANT OF A STRATEGIC UNMANNED AIRCRAFT**

R. N. Agaev, N. Z. Agaev, D. A. Osipov, A. V. Koroteev, A. G. Ganjin

Military Educational Scientific Center Air Force “Air Force Academy  
named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”  
Russian Federation, 394064, Voronezh, st. Old Bolsheviks, 54a  
E-mail: nurad@yandex.ru

*In order for a strategic unmanned aerial vehicle to be able to carry out the tasks lying before it, it must be equipped with an appropriate power plant, which must have the required traction characteristics.*

*Keywords: power plant, design, thrust, strategic unmanned aerial vehicle.*

Современные беспилотные летательные аппараты (далее по тексту – БпЛА) военного назначения позволяют решать задачи, которые невозможно выполнить при помощи наземной техники, авиации или силами сухопутных подразделений.

Немаловажным фактом является то, что нанесение ударов по расположению сил, по скоплению техники или по местам расположения стратегических объектов противника производится дистанционно, то есть без прямого контакта или воздействия.

Происходит это путем управления БпЛА на большом удалении, где оператору можно обеспечить защиту и все условия, необходимые для его нормальной работоспособности, без угрозы его жизни.

Для того, чтобы проектируемый БпЛА смог выполнить поставленную перед ним боевую задачу, он должен обладать такой силовой установкой, которая способна гарантировать предъявляемые требования к летно-техническим и пилотажным характеристикам [2].

Для проектирования двигателя беспилотного летательного аппарата необходимо задать параметры, указанные в таблице [1; 3].

Значение тяги, выдаваемое проектируемым двигателем, соответствует режиму работы «Максимал» и определяется формулой [4]:

$$P = G_B \cdot (C_c - V), \text{ [Н]} \quad (1)$$

где  $G_B$  – расход воздуха, кг/с;  $C_c$  – скорость течения газа из сопла, м/с;  $V$  – скорость полета летательного аппарата.

Соответственно, значение удельного расхода топлива для получения такой тяги находим по формуле [5]:

$$C_{уд} = \frac{3600 G_T}{P_{уд}} \left( 1 - \frac{g_{охл} - g_{отб}}{1 + m} \right), \text{ [кг/(Н·ч)]} \quad (2)$$

где  $G_T$  – расход топлива в основной камере сгорания, кг;  $P_{уд}$  – удельная тяга двигателя, кг/с;  $g_{охл}$  – относительный расход воздуха, потребный для охлаждения турбины;  $g_{отб}$  – относительный расход воздуха, отбираемый на нужды самолета;  $m$  – степень двухконтурности двигателя.

На основе полученных данных получают дроссельные и высотно-скоростные характеристики проектируемого двигателя (рис. 1 и 2 соответственно).

Исходные данные для спроектированного двигателя БПЛА

Наименование	Значение	Наименование	Значение
Высота, км	18	Относительный расход воздуха, отбираемый на нужды самолета $g_{отб}$	0,02
Число Маха	0,5	КПД КНД	0,85
Степень повышения давления	9,00	КПД КВД	0,86
Температура газа перед турбиной, Т	1150	КПД ТНД	0,9
Степень двухконтурности, $m$	0,4	КПД ТВД	0,89
Тяга, кН	42	КПД Мех	0,99
Коэффициент восстановления полного давления во втором контуре, $\square_{II}$	0,99	Удельная теплоемкость топлива $H_u$ , кДж/кг	43000
Коэффициент восстановления полного давления в ОКС, $\square_{КС}$	0,96	Коэффициент расширения, $\phi_c$	0,99
Относительный расход воздуха, потребный для охлаждения турбины, $g_{охл}$	0,01	Расход воздуха, $G_b$ кг/с	80

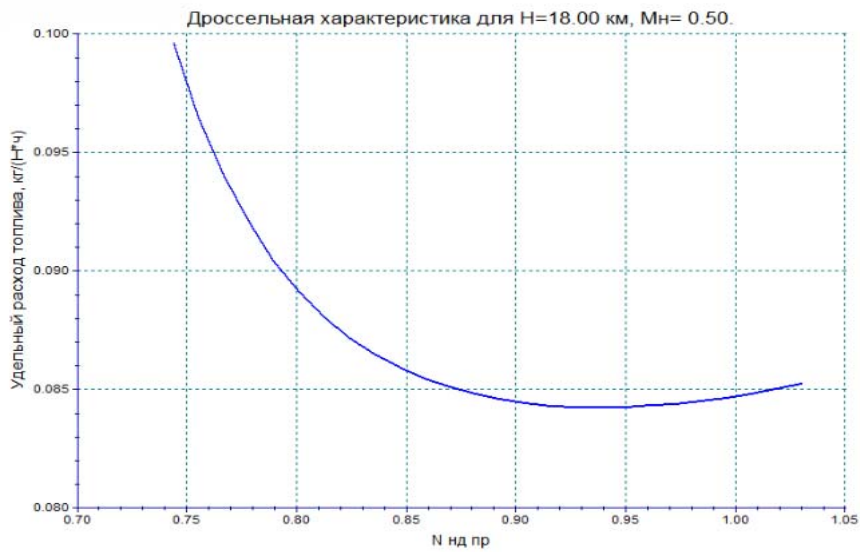


Рис. 1. Дроссельная характеристика проектируемого двигателя БПЛА

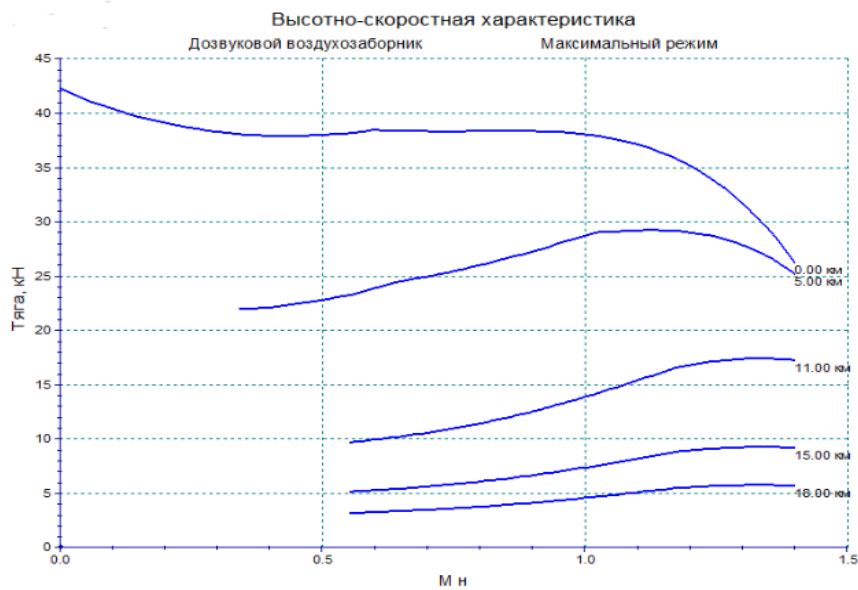


Рис. 2. Высотно-скоростная характеристика проектируемого двигателя БПЛА

### **Библиографические ссылки**

1. Выбор основных параметров самолета : учеб. пособие. Воронеж : ВУНЦ ВВС, 2012. 125 с.
2. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов / под ред. Н. С. Голубева и Ю. И. Янкевича. М. : МАИ, 2005. 283 с.
3. Федоров Р. М., Полев А. С., Дрыгин А. С. Расчет параметров и характеристик ТРДД и ТРДДСМ. М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2002.
4. Казанджан П. К., Тихонов Н. Д. Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин. М. : Машиностроение, 1995. 316 с.
5. Теория авиационных двигателей: в 2 ч. / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров, В. Н. Котовский, А. С. Полев ; под ред. Ю. Н. Нечаева. М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2012. Ч. 2.

### **References**

1. The choice of the main parameters of the aircraft. Textbook on course design in the discipline Design and

strength of aircraft: Textbook. Voronezh : Air Force Research Center, 2012. 125 p.

2. Fundamentals of the design, engineering, construction and production of aircraft / Edited by N. S. Golubeva and Y. I. Yankevich. Moscow, MAI, 2005 283 p.

3. Fedorov R. M., Polev A. S., Drygin A. S. Calculation of parameters and characteristics of turbofan engines and turbofan engines. Moscow, Publishing. VVIA them. prof. N. E. Zhukovsky, 2002.

4. Kazanjan P. K., Tikhonov N. D. Theory of aircraft engines. Theory of blade machines. Moscow, Mechanical Engineering, 1995, 316 p.

5. Theory of aircraft engines: in 2 hours / Y. N. Nechaev, R. M., Fedorov V. N. Kotovsky, A. S. Polev ; under the editorship of Y. N. Nechaeva. Moscow, Publishing. VVIA them. prof. N. E. Zhukovsky, 2012. Part 2.

© Агаев Р. Н., Агаев Н. З., Осипов Д. А.,  
Коротеев А. В., Ганжин А. Г., 2019

УДК 621.45.015.4

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖРД

И. В. Асташов, А. И. Белькевич, П. А. Миронов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: artem-belkevi4@mail.ru

*Рассматриваются методы повышения энергетических параметров жидкостных ракетных двигательных установок.*

*Ключевые слова: ЖРД, удельный импульс, турбонасосный агрегат, камера сгорания.*

## METHODS TO INCREASE THE ENERGY PARAMETERS OF THE LPRE

I. V. Astashov, A. I. Belkevich, P. A. Mironov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: artem-belkevi4@mail.ru

*Methods of increasing the energy parameters of liquid rocket engines are considered.*

*Keywords: LPRE, specific impulse, turbopump, combustion chamber.*

Важной задачей при проектировании жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) является получение высоких значений энергетических параметров при малой массе и габаритах двигательной установки (ДУ). Однако существует ряд ограничений, связанных как с конечными энергоемкостными характеристиками существующих топлив, так и с физико-химическими свойствами конструкционных материалов [1; 2].

В данных рамках необходимо найти компромиссное решение по конструкции двигателя, сочетающее в себе надежность, простоту и энергоэффективность.

На сегодняшний день наметилось несколько методов повышения энергетических параметров двигателя:

- оптимизация основных параметров двигателя (давления в КС, степени расширения сопла, схемы двигателя);
- совершенствование конструкции узлов и агрегатов ДУ;
- применение перспективных способов теплозащиты и охлаждения ДУ.

Повышение давления в КС до максимально реализуемых значений позволяет снизить массу и габариты ДУ, а также получить прирост удельного импульса за счет увеличения степени расширения газов в сопле. В данном случае возникает потребность в системе подачи топлива, обладающей высокими производительностью и значением КПД, и эффективной системе охлаждения двигателя.

КПД системы подачи топлива характеризуется главным образом конструкцией турбонасосного агрегата (ТНА).

Модернизация конструкции газогидравлического тракта ТНА, подробно описанная в работе [3], позво-

ляет повысить антикавитационные свойства насоса и его КПД. Также актуальным является применение бустерных турбонасосных агрегатов (БТНА), устанавливаемых как на баках, так и непосредственно перед входом в основной ТНА. Это решение позволяет быстроходным турбонасосам, имеющим малые габариты и массу, подавать большие расходы компонентов с высокими давлениями подачи и малыми давлениями наддува топливных баков [4].

Традиционно для охлаждения камер ЖРД используется метод регенеративного охлаждения. Недостатками его являются: высокая тепловая нагрузка огневой стенки камеры двигателя, ввиду пропускания через нее значительного теплового потока от продуктов сгорания, обеспечения значительного расхода окислителя через рубашку охлаждения, трудоемкость в изготовлении каналов охлаждения, применение дорогостоящих материалов с высокими показателями теплопроводности. Очевидно, что в результате снятия и отвода теплоносителем тепловых потоков возникают значительные потери давления в рубашке, что приводит к усложнению двигательной установки в целом и потери ее эффективности.

Поэтому особое внимание стоит уделить техническому решению [5], в котором рассматривается создание эффективного внутреннего пристеночного охлаждения с одновременным созданием тягового усилия при реализации вихревого течения в камере ЖРД.

Аналогичное техническое решение рассмотрено в работе [6] отличием от [5] является использование смесительной головки для подачи в камеру сгорания горючего, а создание низкотемпературной завесы выполнено аналогично при помощи тангенциальных

каналов. Результаты серии горячих запусков показали высокую эффективность работы подобного типа двигателей. Так для РД, работающем на компонентах топлива  $H_2+O_2$ , удельный импульс составил 97 % от теоретически возможного (рассчитанного с помощью программы SEA 2000) [7].

Таким образом, совокупность представленных выше методов и подходов при проектировании и конструировании ЖРД может позволить повысить их энергетические параметры, а, следовательно, увеличить полезную нагрузку ракеты-носителя.

#### Библиографические ссылки

1. Зуев А. А., Назаров В. П., Арнгольд А. А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.

2. Зуев А. А., Павлыш А. А. Исследование течения с теплоотдачей в стенку в граничных условиях агрегатов подачи энергетических установок летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. С. 137–138.

3. Модернизация систем подачи топлива жидкостных ракетных двигателей разгонных блоков на основе инновационных технических решений / В. Ю. Пиунов, В. П. Назаров, Р. И. Константинов и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2016.

4. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др. ; под общ. ред. В. М. Кудрявцева. М. : Высшая школа, 1967. 695 с.

5. Пат. РФ № 2403426, 10.11.2010. Способ охлаждения огневой стенки камеры ЖРД и устройство для его реализации / А. М. Захаров. 2010.

6. Chiaverini M. J., Sauer J. A., Munson S. M. «Laboratory Characterization of Vortex-Cooled Thrust Chambers for Methane/O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>». AIAA-2005-4131, 2005.

7. Богачева Д. Ю. Моделирование внутреннего (завесного) охлаждения ракетного двигателя малой тяги на экологически чистых газообразных компонентах топлива : дис. ... канд. тех. наук. М., 2014. С. 18–20.

#### References

1. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A. [The local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the cavities of rotation of the gas turbines] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2019. Vol. 26, № 2. P. 99–115.

2. Zuev A. A., Pavlysh A. A. [Issledovaniye techeniya s teplootdachey v stenuku v granichnykh usloviyakh agregatov podachi energeticheskikh ustanovok letatelnykh apparatov] // Reshetnevskiy chteniya. 2014. Vol. 1. P. 137–138.

3. *Modernizaciya sistem podachi topliva zhidkostnykh raketnykh dvigatelej razgonnykh blokov na osnove innovacionnykh tekhnicheskikh reshenij* [Modernization of fuel supply systems for liquid rocket engines of booster blocks based on innovative technical solutions] / V. Yu. Piunov, V. P. Nazarov, R. I. Konstantinov et al. // Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij. 2016.

4. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelej: Uchebnoe posobie dlya aviacionnykh vuzov i fakul'tetov* [Fundamentals of the theory and calculation of liquid rocket engines: A manual for aviation universities and faculties] / A. P. Vasil'ev, V. M. Kudryavcev, V. A. Kuznecov et al. ; pod obshch. red. V. M. Kudryavceva. Moscow, Vysshaya shkola, 1967. P. 695.

5. Patent RF № 2403426, 10.11.2010 *Sposob ohlazhdeniya ognevoj stenki kamery ZHRD i ustrojstvo dlya ego realizacii* [Method for cooling the fire wall of the rocket engine chamber and device for its implementation] / A. M. Zaharov. 2010.

6. Chiaverini M. J., Sauer J. A., Munson S. M. «Laboratory Characterization of Vortex-Cooled Thrust Chambers for Methane/O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>». AIAA-2005-4131, 2005.

7. Bogacheva D. Yu. *Modelirovanie vnutrennego (zavesnogo) ohlazhdeniya raketnogo dvigatelya maloj tyagi na ekologicheski chistykh gazoobraznykh komponentah topliva: dis. kand. tekh. nauk.* [Modeling of internal (curtain) cooling of a thrust rocket engine on environmentally friendly gaseous fuel components. PhD. techn. sci. diss.] 2014. P. 18–20.

© Асташов И. В., Белькевич А. И.,  
Миронов П. А., 2019

УДК 621.454.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБИН

К. В. Алексеев, А. В. Волосяников, А. С. Королев, В. Д. Нестеров

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

*Проведено аналитическое исследование локального коэффициента теплоотдачи для ламинарных режимов течения в элементах, характерных проточным частям газовых турбин. Исследование выполнено для случая  $Pr = 1$ , что наиболее характерно для газообразных рабочих тел.*

*Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, турбина, агрегат подачи, жидкостный ракетный двигатель.*

## INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER OF LAMINAR FLOWS IN ELEMENTS OF TURBINE FLOW PARTS

K. V. Alekseev, A. V. Volosyanikov, A. S. Korolev, V. D. Nesterov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: listreber@gmail.com

*An analytical study of the local heat transfer coefficient for laminar flow regimes in the elements characteristic of the flow parts of gas turbines is carried out. The study was performed for the case of  $Pr = 1$ , which is most typical for gaseous working bodies.*

*Keywords: heat transfer coefficient, turbine, feed unit, liquid rocket engine.*

Применение высоких температур ограничивается работоспособностью конструкции. В ЖРД применяются неохлаждаемые турбины. Из-за конструктивных особенностей и применяемых материалов температура рабочего тела перед неохлаждаемой турбиной ограничивается, как правило, для восстановительного газа 1000–1200 °С, для окислительного газа 700–900 °С. Чем большую температуру перед турбиной можно допустить, тем меньше должно быть давление перед турбиной. Высокие температуры рабочего тела приводят к температурным деформациям, в том числе и дисков турбин [1; 2].

Существующие на сегодняшний день логарифмические и степенные профили аппроксимации эпюры скорости в пристенном пограничном слое имеют существенные недостатки: не могут описывать распределение скорости в непосредственной близости от стенки, так как существует вязкий подслой. Исследование выполнялось для ламинарного течения и слоя  $Pr = 1$ . Для ламинарного течения степень распределения профиля скорости как правило  $m = 1 \dots 3$ .

Рассмотрим локальную теплоотдачу для закона распределения профиля скорости:

$$\bar{u} = 1 - (1 - \bar{y})^m,$$

где  $u$  – окружная скорость;  $y$  – координата,  $m$  – показатель степени.

Интегральное соотношение уравнения энергии прямолинейного равномерного потока имеет вид [1–3]

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (\delta_{t\varphi}) = \frac{\lambda m^2}{\rho C_p U (m+1)(2m+1)} \cdot \frac{1}{\delta_{t\varphi}},$$

где  $\delta_{t\varphi}$  – толщина вытеснения температурного слоя;  $\partial \varphi$  – угол поворота радиус-вектор;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – теплоёмкость;  $U$  – окружная скорость.

Разделив, переменные и проинтегрируем от нуля до текущего значения переменных

$$\begin{aligned} \delta_{t\varphi} &= \int_0^{\delta_{t\varphi}} \delta_{t\varphi} d\delta_{t\varphi} = \frac{\lambda m^2}{\rho C_p U (m+1)(2m+1)} \int_0^{\varphi} d\varphi = \\ &= \sqrt{\frac{2m^2 \lambda \varphi}{\rho C_p U (m+1)(2m+1)}}, \end{aligned}$$

где  $\varphi$  – продольная координата (аналог  $x$  для плоского случая).

С учетом закона теплоотдачи, локальный коэффициент теплоотдачи прямолинейного течения в виде критерия Стантона

$$\begin{aligned} St &= \sqrt{\frac{m^2}{2(m+1)(2m+1)} \frac{\lambda}{\mu C_p} \frac{\mu}{\rho U \varphi}} = \\ &= \sqrt{\frac{m^2}{2(m+1)(2m+1) Pr Re_U}}. \end{aligned}$$

Локальный коэффициент теплоотдачи определяется

$$\alpha = \rho C_p U \cdot St,$$

где  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – теплоёмкость;  $U$  – скорость.

Для вращательного течения без учета диссипации интегральное соотношение уравнения энергии [1–5]

$$JE \frac{\partial}{\partial R} (\delta_{тф}) + \frac{JE}{R} \delta_{тф} - \frac{\lambda m^2}{\rho C_p U (m+1)(2m+1)} \frac{1}{\delta_{тф}} = 0,$$

где  $J$ ,  $E$ ,  $R$  – характерные существенно положительные величины.

Для вращательного течения, по закону «твердого тела»  $\frac{U}{R} = \omega = \text{const}$ , интегральное соотношение уравнения энергии принимает вид [4; 5]

$$\frac{\partial}{\partial R} (\delta_{тф}) + \frac{\delta_{тф}}{R} - \frac{\lambda m^2}{JE \rho C_p \omega (m+1)(2m+1)} \frac{1}{R \delta_{тф}} = 0.$$

Введя промежуточные обозначения, определим уравнение как линейное первого порядка и решив уравнение относительно толщины пограничного слоя. Окончательно получаем

$$y = u \vartheta = \delta_{тф} = \sqrt{\frac{\lambda m^2}{JE \rho C_p \omega (m+1)(2m+1)}}.$$

С учетом закона теплообмена критерий Стантона для вращения по закону «твердого тела» имеет вид

$$St = \sqrt{\frac{m^2 JE}{(m+1)(2m+1)} \left( \frac{\lambda}{\mu C_p} \right) \left( \frac{\mu}{\rho \omega R^2} \right)} = \sqrt{\frac{m^2 JE}{(m+1)(2m+1) \text{Pr Re}_\omega}}.$$

Учитывая, что реализуется вращательное течение по закону «свободного вихря»  $UR = C = \text{const}$ , записываем

$$\frac{d\delta_{тф}}{dR} + \frac{\delta_{тф}}{R} - \frac{\lambda m^2}{JE \rho C_p C (m+1)(2m+1)} \frac{R}{\delta_{тф}} = 0,$$

Уравнение линейное первого порядка, решение ведется относительно толщины пограничного слоя. Окончательно получаем

$$\delta_{тф} = R \sqrt{\frac{\lambda m^2}{2JE \rho C_p C (m+1)(2m+1)}}.$$

Критерий Стантона для вращения жидкости по закону «свободного вихря»

$$St = \sqrt{\frac{2m^2 JE}{(m+1)(2m+1) \text{Re}_\omega}}.$$

Получены аналитические зависимости для локальных коэффициентов теплоотдачи, для случая течения газового потока для граничных условий проточных частей газовых турбин жидкостных ракетных двигателей.

#### Библиографические ссылки

1. Зуев А. А., Назаров В. П., Арнгольд А. А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использование модели температурного пограничного

слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.

2. Зуев А. А., Павлыш А. А. Исследование течения с теплоотдачей в стенку в граничных условиях агрегатов подачи энергетических установок летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. С. 137–138.

3. Интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя / А. А. Зуев, В. О. Фальков, В. А. Панченко, А. А. Филиппов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2010. № 2 (17). С. 37–42.

4. Кишкин А. А., Зуев А. А., Леонов В. П. Локальная теплоотдача в граничных условиях турбомашин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1(658). С. 3–10.

5. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя с конвективной составляющей в полостях вращения ТНА ЖРД / А. А. Зуев, В. Ю. Пиунов, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19, № 2. С. 30–44.

#### References

1. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A. [The local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the cavities of rotation of the gas turbines]. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2019. Vol. 26. № 2. P. 99–115.

2. Zuev A. A., Pavlysh A. A. [Issledovaniye techeniya s teplootdachey v stenku v granichnykh usloviyakh agregatov podachi energeticheskikh ustanovok letatelnykh apparatov] // Reshetnevskiy chteniya. 2014. Vol. 1. P. 137–138.

3. Integral relation of the energy equation of the temperature spatial boundary layer / A. A. Zuev, V. O. Falkov, V. A. Panchenko, A. A. Filippov // Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solovyeva. 2010. № 2 (17). P. 37–42.

4. Kishkin A. A., Zuev A. A., Leonov V. P. [Local heat transfer in the boundary conditions of turbomachines] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. 2015. № (658). P. 3–10.

5. Determination of the local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the rotation cavities of the LRE turbopump / A. A. Zuev, V. Yu. Piunov, V. P. Nazarov, A. A. Arngold // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. 2019. Vol. 19. № 2. P. 30–44.

© Алексеев К. В., Волосяников А. В.,  
Королев А. С., Нестеров В. Д., 2019



УДК 621.45.02

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ БУСТЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Д. С. Баленков, Д. А. Соколов, П. А. Дубынин, М. И. Толстопяттов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: Kubik24rus@mail.ru

*Рассматриваются особенности проведения эксперимента по определению КПД электронасосного агрегата, особенности конструкции стенда для проведения испытаний, а также описана методика обработки данных по полученным экспериментальным данным.*

*Ключевые слова: электронасосные агрегаты, КПД, методика обработки данных, методика проведения эксперимента.*

## METHODS OF TESTING AND PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA OF BOOSTER ELECTRIC PUMP UNITS

D. S. Balenkov, D. A. Sokolov, P. A. Dubynin, M. I. Tolstopyatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Kubik24rus@mail.ru

*The paper discusses the features of the experiment to determine the efficiency of the electric pump unit, the design features of the test bench, and describes the methodology for processing data from the obtained experimental data.*

*Keywords: electric pump units, efficiency, methods of data processing, methods of the experiment.*

В проводимой работе рассматривается возможность применения электродвигателей (ЭД) в качестве приводов бустерных насосных агрегатов (БНА). В большинстве БНА приводом является гидротурбина, имеющая ряд недостатков, таких как низкий КПД, сложность изготовления и сложность управления. Применение ЭД позволит упростить общую схему ЖРД, повысить общий КПД системы и упростить запуск ЖРД [1].

На данный момент по теме исследования выполнены: методика расчёта БНА, позволяющая теоретически определить эффективность использования ЭД в качестве приводов БНА. Также разработана принципиальная схема стенда для испытаний электронасосного агрегата ЖРД.

Следующим этапом в проводимом исследовании является составление методики проведения эксперимента и разработка методики обработки полученных результатов.

Основными частями и системами стенда (см. рисунок) являются: испытываемый насос, пневмогидравлическая система, средства измерения.

Рабочей жидкостью для испытаний является чистая холодная вода, качество которой должно соответствовать требованиям, предусмотренным в отраслевой нормативно-технической документации: температура не выше 313 К (40 °С), плотность до 1100 кг/м<sup>3</sup> [2].

Гидравлическая система испытательного стенда выполняется в виде замкнутого контура по схеме: расходная емкость – всасывающий трубопровод – испытываемый насос – напорный трубопровод – расходная емкость.

Расходная емкость служит тепловым аккумулятором и компенсатором температурного расширения жидкости, деаэратором и гасителем пульсаций потока.

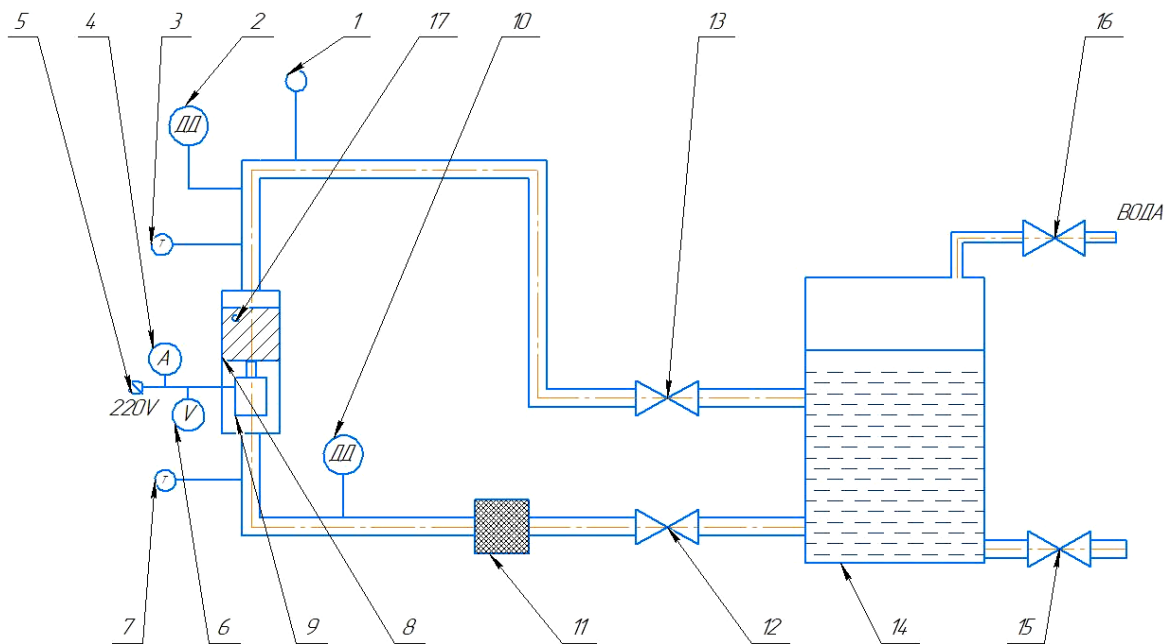
Перед входом в насос устанавливается сетчатый многослойный фильтр для очистки воды от механических примесей.

Для исключения влияния стендовых трубопроводов на гидравлические характеристики электронасоса, его устанавливают таким образом, чтобы на входе и выходе создавались прямолинейные участки трубопровода.

Стендовые магистрали должны быть герметичны на всех режимах работы. Течи в соединениях не допускаются.

В качестве регулирующих и запорных органов пневмогидравлической системы используются вентили. Запорные органы имеют два положения: открытое и закрытое.

Регулирующие органы, используемые как дроссельные устройства, предназначены для изменения гидравлического сопротивления системы при получении рабочей характеристики.



Принципиальная схема стенда для испытаний бустерных насосов:  
 1 – датчик расхода; 2, 10 – датчик давления; 3, 7 – датчик температуры; 4 – амперметр;  
 5 – источник питания; 6 – вольтметр; 8 – шнек; 9 – электродвигатель;  
 11 – фильтр; 12, 13, 15, 16 – вентиль; 14 – расходная емкость; 17 – датчик оборотов

В процессе подготовки стенда к проведению испытаний необходимо проверить внешнее состояние насоса, лёгкость вращения его ротора. Во избежание засорения насоса мелкими частицами и пылью предварительно необходимо промыть рабочие полости стенда водой.

Далее необходимо установить насос и необходимое измерительное оборудование, а именно датчики расхода, давления, температуры, амперметр, вольтметр и фильтр. После чего все приборы приводятся в рабочее состояние, и проверяется нулевое положение датчиков. Для проверки правильности монтажа элементов стенда необходимо произвести предварительный запуск ЭД на пониженной мощности. При этом необходимо оценить уровень шума, наличие посторонних звуков и проверить герметичность соединений трубопроводов.

При определении рабочей характеристики электронасоса измеряют и определяют следующие параметры: объемный расход рабочей жидкости, давление на входе в насос, давление на выходе из насоса, скорость вращения шнека насоса, температуру воды, напряжение и силу тока, подаваемые от источника питания на электродвигатель. Коэффициент полезного действия (КПД) шнека и КПД электродвигателя при проведении испытаний не определяется, так как определяется КПД электронасосного агрегата в целом.

КПД электронасосного агрегата определяется по формуле

$$\eta = \frac{H \cdot m}{N},$$

где  $H$  – напор, создаваемый насосом;  $m$  – массовый расход воды;  $N$  – потребляемая электродвигателем мощность.

Напор, создаваемый насосом, определяется по формуле

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho},$$

где  $P_2$  – давление на выходе из насоса, измеряемое датчиком давления 2;  $P_1$  – давление на входе в насос, измеряемое датчиком давления 10;  $\rho$  – плотность воды, справочная величина равная  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Массовый расход определяется аналитически по формуле

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V},$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $\dot{V}$  – объемный расход, измеряемый ротаметром, установленный после электронасосного агрегата.

Мощность, потребляемая электродвигателем, определяется по формуле

$$N = U \cdot I,$$

где  $U$  – напряжение источника питания;  $I$  – ток источника питания.

Таким образом, разработанная методика проведения эксперимента и методика обработки данных позволяют подтвердить полученный ранее аналитическим путём КПД электронасосного агрегата. Также эксперимент позволит проверить работу электродвигателя в жидкой среде. Следующими этапами в проводимом исследовании являются создание методики учёта погрешностей при проведении эксперимента и обработки результатов, проектирование стенда для испытаний.

#### Библиографические ссылки

1. Баленков Д. С., Соколов Д. А., Толстопятов М. И. Анализ использования электродвигателей в качестве

привода для бустерных насосов ЖРД разгонных блоков // Гагаринские чтения : материалы XLV междунар. молодёжной научной конф. (16–19 апреля 2019, г. Москва): в 1 ч. / Московский авиационный институт. М., С. 172–173.

2. Технология сборки и испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / М. В. Краев, В. П. Назаров, Л. П. Назарова и др. / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1993. 102 с.

#### References

1. Balenkov D. S., Sokolov D. A., Tolstopjatov M. I. [Analysis of the perspectives of using the electric motors

as a drive the booster pupmps of the loader pumps] // *XLV Mezhdunarodnaja molodjozhnaja nauchnaja konferencija «Gagarinskie chtenija»* [XLV Gagarin science conference]. Moscow Aviation Institute. Moscow, 2019. P. 172–173 (In Russ.).

2. Kraev M. V., Nazarov V. P., Nazarova L. P. and others. *Tehnologija sborki i ispytanij nasosov zhidkostnyh raketnyh dvigatelej*. [Technology of assembly and testing of liquid rocket engine pumps] / Sib. aerospace acad. Krasnoyarsk, 1993. 102 p.

© Баленков Д. С., Соколов Д. А., Дубынин П. А., Толстопятов М. И., 2019

УДК 621.45.018.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ГРАДУИРОВОЧНЫХ СИСТЕМ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СТЕНДОВ ИСПЫТАНИЙ ЖРД

А. М. Бегишев, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: alex-beg95@mail.ru

*Авторы рассматривают существующие градуировочные системы силоизмерительных устройств на испытательных стендах ЖРД, выделяют основные факторы выбора систем, приводят данные о точности измерения.*

*Ключевые слова: испытательный стенд ЖРД, силоизмерительное устройство, градуировочная система.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF CALIBRATION SYSTEMS OF THRUST-MEASURING DEVICES OF TEST STANDS FOR LIQUID ROCKET ENGINES

A. M. Begishev, V. Yu. Zhuravlev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: alex-beg95@mail.ru

*The authors consider the existing calibration systems of thrust measuring devices in the test stands for rocket engine, identify the main factors for the choice of systems, provide data on the accuracy of the measurement.*

*Keywords: firing test stand, thrust measurement device, Calibration system.*

Для прямого измерения тяги жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) испытательные стенды оборудуются специальными силоизмерительными устройствами (СИУ), конструктивно состоящими из станка, измерительной и градуировочной систем. Станок состоит из двух основных элементов: неподвижной станины и рамы, которая воспринимает тягу и передает ее на измерительное устройство и станину. [2] Конструкция СИУ на испытательном стенде зависит от расположения на рабочем месте оси испытуемых двигателей, а также их мощностных характеристик. В зависимости от конструкции станки можно подразделить на следующие группы: станки с минимальным трением, станки с упругими связями между станиной и подвижной рамой, жесткие станки, специальные станки. В настоящее время наиболее распространены конструкции СИУ с жесткими станками и станками с упругими связями.

К измерительной системе предъявляются высокие требования – допустимая предельная погрешность в большинстве случаев не должна превышать 0,3–0,5 % от номинального значения. Реализация этих требований обеспечивается применением измерительных систем высокого класса точности, установкой их на стендах в местах, защищенных от действия вибраций, переменных температур и других дестабилизирующих факторов, градуировкой измерительной системы непосредственно до и после проведения огневого испытания, периодической аттестацией измерительной системы с использованием эталонных устройств на подтверждение класса точности.

Градуировочная система СИУ по отношению к измерительной системе является образцовой и предназначена для её поверки и градуировки. Градуировку СИУ проводят после всех технологических работ по установке трубопроводов, кабельных переходников и всех вспомогательных элементов крепления, влияющих на вес испытуемого ЖРД. Система градуировки напрямую зависит от типа СИУ и может быть связана различными конструктивными способами [1]. Существует несколько отработанных градуировочных систем, применяемых на испытательных стендах.

Одной из таких систем является создание нагрузки специальными гидронагрузжателями. Согласно работе [3] примером применения СИУ данного типа является испытательный стенд ОАО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко». Сущность создания точной величины градуировочного усилия, в данном случае, сводится к использованию дополнительного эталонного силоизмерителя, по показаниям которого производится нагрузка и корректировка усилия развиваемого гидравлическим нагрузочным устройством. Погрешность данного метода зависит от погрешности измерения эталонного силоизмерителя, и может достигать порядка 0,1 % и менее. Достоинствами данной системы является возможность дистанционного управления процессом градуировки, возможностью поддержания постоянной нагрузки без подачи насосом дополнительной жидкости или давления, а также в силу особенности гидронагрузжателя могут располагаться на значительном расстоянии от насосов и двигателей с минимальной потерей мощности. Гидравли-

ческая система, при всех своих достоинствах, для эксплуатации требует размещения и обслуживания целого комплекса дополнительного оборудования (масляные баки и насосы, системы фильтрации масла, радиаторы для охлаждения, распределители и шланги для подачи и возврата рабочей жидкости, дроссели, клапаны, датчики и т. д.).

В настоящее время широкое распространение имеют и СИУ с рычажной градуировочной системой. С помощью призмных опор система связана рычагами с подвижной рамой, через которые к последней может быть приложена известная сила, соответствующая по направлению тяге двигателя. Рычажные системы состоят из рычагов 1 и 2-го рода, опорных и соединительных узлов, вспомогательных элементов. Примером применения СИУ данного типа является испытательный стенд производства «Испытательно-заправочный комплекс» АО «Красмаш». Первостепенное значение для точности работы имеет жесткость рычагов, т. е. малая величина деформации под нагрузкой. Погрешность градуировочной системы рычажного типа зависит от точности передаточных отношений рычагов, а также от состояния поверхностей призмных опор, так как те обладают повышенным износом при вибрационных нагрузках. В связи с чем передаточное отношение рычагов определяют весовым способом. Для этого проверяемый рычаг с запрессованными в него призмами нагружают в горизонтальном положении. На одно плечо рычага навешивают известный груз, на другое – уравновешивающий его груз. По отношению масс грузов подсчитывают передаточное отношение. При использовании гирь третьего класса точность передаточного отношения составляет около 0,01 %. Достоинством данной системы является ее конструктивная простота и отсутствие большого числа дополнительного оборудования. В то же время система обладает следующими недостатками: трудоемкостью и невозможностью дистанционного управления процессом градуировки, кратностью ступеней нагрузки величине массы тарировочных гирь, повышенным износом призмных опор, влияющих на чувствительность системы и точность измерения.

Наблюдая за опытом модернизации испытательно-го оборудования в авиационной промышленности, можно выделить некоторые тенденции. До настоящего времени, в большинстве эксплуатируемых стендов статических испытаний в качестве силовозбудителей применялись системы, построенные на гидравлическом или пневматическом принципе передачи усилия. Согласно [4] при создании стенда статических испытаний двигателя ПД-14 научно-производственным предприятием «МЕРА» было заложено принципиально иное решение по созданию нагружающего усилия. В качестве нагружающих элементов системы были выбраны электромеханические цилиндры на базе планетарной ролико-винтовой передачи, развивающих усилия до 40 тс. Высокая точность нагружения была достигнута применением тензорезисторных S-образных датчиков сжатия-растяжения, установлен-

ных между штоком электроцилиндра и объектом испытаний. Возникающее на них напряжение, пропорциональное приложенному усилию, поступает на входы модуля ввода/вывода, где сигнал обрабатывается и передается в процессорный модуль и далее на частотные преобразователи. Информация о реальной величине усилий на штоках электроцилиндров позволило обеспечить высокую точность нагружения. Пределы основной приведенной погрешности измерения усилия составило  $\pm 0,5\%$ . Учитывая преимущества и опыт использования электромеханических силовозбудителей в данной сфере, можно утверждать о целесообразности их внедрения в градуировочные системы силоизмерительных устройств огневых испытательных стендов ЖРД в качестве силового привода.

### Библиографические ссылки

1. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / В. Г. Яцуненко, В. П. Назаров, А. И. Коломенцев ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с.
2. Испытание жидкостных ракетных двигателей / А. Е. Жуковский, В. С. Кондусев, В. Я. Левин и др. ; под ред. В. З. Левина. М. : Машиностроение, 1981. 199 с.
3. Расчетный анализ прочности силоизмерительного устройства стенда для испытаний ЖРД с тягой 1000 тс / А. Н. Лошкарев, Д. В. Мерзляков, А. Е. Милов и др. // Труды НПО Энергомаш им. академика Глушко / под ред. В. К. Чванного. 2012. С. 311–327.
4. Научно-производственное предприятие «МЕРА» [Электронный ресурс]. URL: <http://nppmera.ru/npp-mera-peredovoyie-resheniya-dlya-staticheskix-ispytanij> (дата обращения: 05.09.2019).

### References

1. Stendovye ispytaniya zhidkostnyh raketnyh dvigatelej : ucheb. posobie [Stand tests of liquid rocket engines: studies. allowance] / V. G. Yacunenko, V. P. Nazarov, A. I. Kolomencev ; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology ; Moscow aviation institute. Krasnoyarsk, 2016. P. 248.
2. Ispytanie zhidkostnyh raketnyh dvigatelej [Test of liquid rocket engines] / A. E. Zhukovsky, V. S. Kondusev, V. Ya. Levin et al. M. : Mashinostroenie, 1981. P. 199.
3. Loshkarev A. N., Merzlyakov D. V., Milov A. E. Raschetnyy analiz prochnosti siloizmeritel'nogo ustroystva stenda dlya ispytaniy ZhRD s tyagoy 1000 ts [Calculated strength analysis of thrust-measuring device of stand for tests of rocket engines with a thrust of 1000 TF] // Trudy NPO Energomash im. akademika Glushko / pod red. V. K. Chvanogo. 2012. P. 311–327
4. Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «MERA» [Scientific-Production Enterprise "MERA] [Electronic resource]. URL: <http://nppmera.ru/npp-mera-peredovoyie-resheniya-dlya-staticheskix-ispytanij> (access: 05.09.2019).

© Бегишев А. М., Журавлев В. Ю., 2019

УДК 629.7.036, 004.942

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ РОТОРА КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

И. А. Грачев\*, Е. В. Кудашов, М. А. Болотов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: grachmalek2602@gmail.com

*Представлены результаты теоретических исследований влияния отклонения формы и расположения контактных поверхностей на погрешности сборочных параметров изделий в аэрокосмической технике.*

*Ключевые слова: сборка, прогнозирование, плоская и цилиндрическая поверхности, погрешность, CAE-система.*

## COMPUTER SIMULATION OF LOW PRESSURE COMPRESSOR ROTOR ASSEMBLY

I. A. Grachev\*, E. V. Kudashov, M. A. Bolotov

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: grachmalek2602@gmail.com

*The results of a theoretical study of the influence of shape deviation and the location of contact surfaces on the errors of assembly parameters of products in aerospace engineering are presented.*

*Keywords: assembly, prediction, detail, flat and cylindrical surfaces, error, CAE system.*

Сборка роторов авиационных ГТД осуществляется с использованием метода индивидуального подбора комплекта деталей [1; 2]. Повышение требований к точности сборки роторов ГТД привело к тому, что размерные допуски сборочных параметров стали сравнимы с погрешностями формы и расположения посадочных поверхностей элементов ротора, проявляющихся в ходе их изготовления.

Ротор компрессора низкого давления состоит из маложестких деталей, к которым относятся диски, проставки, промежуточные кольца. В процессе сборки ротора детали приобретают окончательную жёсткость и форму, а в разобранном состоянии имеют погрешность формы и расположения посадочных поверхностей [3]. На этапе контроля, зачастую величины сборочных параметров выходят за допустимые значения. Для снижения погрешностей сборочных параметров ротор разбирается, и производится изменение углового положения отдельных деталей. В ходе изменения взаимного углового положения деталей выполняется компенсация систематических погрешностей изготовления деталей.

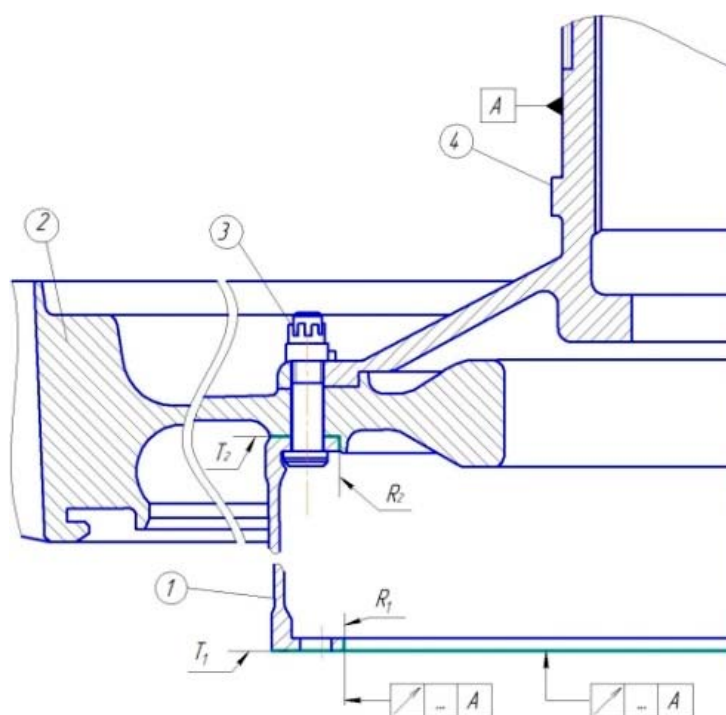
Оптимальное положение деталей в роторе позволит собрать ротор с прямой геометрической осью, что создаёт возможности для снижения общего дисбаланса ротора [4].

Главной задачей компьютерного моделирования является прогнозирование сборочных параметров с учетом влияния отклонения формы и расположения поверхностей посадочных поверхностей деталей ро-

тора. Применение компьютерного моделирования может позволить сократить трудоемкость и повысить точность сборки путем прогнозирования сборочных параметров и определения оптимального углового положения деталей в сборочном пакете до процесса сборки [5].

На рисунке приведен рассматриваемый в работе объект, которым является третья ступень компрессора низкого давления, включающая вал – 4, диск – 2, болтовое соединение – 3 и промежуточное кольцо – 1.

Для компьютерного моделирования использовалась номинальная 3D-модель промежуточного кольца с перестроенной радиальной  $R_2$ , и торцевой  $T_2$  поверхностью. Были проведены два численных эксперимента, отличающиеся угловым расположением моделируемого отклонения на поверхности промежуточного кольца. Угловое расположение моделируемых поверхностей отличалось в экспериментах на 90 градусов. Поверхность  $R_2$  промежуточного кольца имела следующие величины отклонения, мм: 0,01; 0,02; 0,04; 0,06; 0,1. Форма отклонения представляет собой эллипс с расстояниями от центра  $F_1 = \text{const} = 250$  мм и  $F_2 = \text{var} = \Delta_{\uparrow p} + 250$  мм. Торцевая поверхность  $T_1$  промежуточного кольца представляет собой форму синусоиды, имеющая два максимума и два минимума. Данное отклонение задавалось значением амплитуды. Величина отклонения взята равными, мм: 0,01; 0,02; 0,04; 0,06; 0,1. Моделирование процесса сборки осуществляется в CAE-пакете ANSYS.



Упрощенная схема первого этапа сборки, ротора компрессора низкого давления

**Сравнение расчетных результатов биения контрольных поверхностей промежуточного кольца 2 в двух взаимных угловых положениях отклонений**

Взаимные угловые положения отклонения, град.		0 град.		90 град.	
Заданные отклонения, поверхности, мм		Величина биения			
Торцевой $T_z$ , мм	Радиальной $R_z$ , мм	$\Delta_{\uparrow T_1}$ , мм	$\Delta_{\uparrow R_1}$ , мм	$\Delta_{\uparrow T_1}$ , мм	$\Delta_{\uparrow R_1}$ , мм
0,01	0,01	0,0058	0,0424	0,0066	0,0521
0,02	0,01	0,0144	0,0591	0,0148	0,0684
0,02	0,04	0,0103	0,0486	0,0116	0,0805
0,04	0,02	0,0212	0,0954	0,0218	0,1121
0,04	0,06	0,0216	0,0803	0,0219	0,1259
0,06	0,04	0,0328	0,1314	0,0331	0,1595
0,06	0,1	0,0331	0,1118	0,0314	0,1749
0,1	0,06	0,0543	0,2031	0,0539	0,2439
0,1	0,1	0,0586	0,2022	0,0595	0,2446

В таблице приведены результаты расчётов для сборки компрессора низкого давления, соединяемых по плоским поверхностям с помощью болтового соединения.

Проанализировав таблицу, можно заключить, что в случае второго взаимного углового расположения поверхностей промежуточного кольца (равного  $90^\circ$ ), наблюдается увеличение торцевого биения до 12,5 % при тех же заданных величинах отклонений.

Результаты так же показали, что все заданные варианты рассматриваемых величин отклонений не привели к превышению контролируемых сборочных заданного торцевого биения величиной 0,1 мм.

Изменение углового расположения отклонений контактирующих поверхностей промежуточного кольца на  $90^\circ$  вызвал увеличение радиального биения на 24 %.

**Библиографические ссылки**

- Ильина М. Е. Метод управления технологическим процессом сборки ротора ГТД дискового типа // Известия Волгоградского технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». 2006. Вып. 2, № 4 (19). С. 25–28.
- Непомилуев В. В., Майорова Е. А. Исследование возможности повышения качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путем учета компенсирующей способности деталей при использовании метода индивидуального подбора // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 9. С. 11–14.
- Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчетов : монография / И. Ф. Кравченко, Э. В. Кондратюк, В. А. Титов и др. Киев : КВИЦ, 2011. 197 с.

4. Безъязычный В. Ф., Семенов А. Н. Научные и методические основы сборки высокотехнологических изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 4. С. 3–7.

5. Безъязычный В. Ф., Непомилуев В. В., Семенов А. Н. Обеспечение качества изделий при сборке. М. : Издат. дом «Спектр», 2012. 204 с.

#### References

1. Plyina M. E. *Metod upravleniya tekhnologicheskim protsessom sborki rotora GTD diskovogo tipa* [Izvestiya Volgogradskogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Progressivnye tekhnologii v mashinostroyeni». Volgograd, 2006. P. 25–28 (In Russ.).

2. Nepomiluev V. V., Mayorova E. A. *Issledovanie vozmozhnosti povysheniya kachestva izgotovleniya vysokotochnykh izdeliy mashinostroyeniya putem ucheta*

*kompensiruyushchey sposobnosti detaley pri ispol'zovanii metoda individual'nogo podbora* [Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni]. 2009. P. 11–14 (In Russ.).

3. Kravchenko I. F. *Sborka rotorov GTD Barabannovskogo tipa: tipovye protsessy, algoritmy raschetov. Monografiya*. Kiev : KVITs, 2011. 198 p. (In Russ.).

4. Bezyazichny V. F., Semenov A. N. *Nauchnye i metodicheskie osnovy sborki vysokotekhnologicheskikh izdeliy* [Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni]. 2004. № 4. P. 3–7 (In Russ.).

5. Bezyazichny V. F., Nepomiluev V. V., Semenov A. N. *Obespechenie kachestva izdeliy pri sborke. Moskva : Izdatel'skiy dom «Spektr», 2012. 204 p.*

© Грачев И. А., Кудашов Е. В.,  
Болотов М. А., 2019



УДК 621.914.7

## ПЯТИОСЕВАЯ ОБРАБОТКА В ПРОИЗВОДСТВЕ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

П. А. Ермаков, М. В. Кубриков

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

*Рассматриваются особенности пятиосевых обрабатывающих центров, возможность их применения в производстве ракетной техники, методы обработки пятиосевых станков и их перспективы.*

*Ключевые слова: пятиосевые обрабатывающие центры, ракетная техника.*

## FIVE-AXIS MACHINING IN ROCKET ENGINE MANUFACTURING

P. A. Ermakov, M. V. Kubrikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: wwwermakru@mail.ru

*The features of five-axis machining centers, the possibility of their application in the manufacture of rocketry, methods of processing five-axis machines and their prospects are considered.*

*Keywords: five-axis machining centers, rocket technology.*

Актуальной тенденцией развития ракетостроения является внедрение инновационных материалов, технологий и способов обработки, направленных на повышение качества конечной продукции и уменьшения ее себестоимости.

Повышенные требования к качеству и увеличившийся спрос на детали со сложной пространственной геометрией, приводят к необходимости использования 5-ти осевых обрабатывающих центров.

Основным отличием пятиосевых центров от классических трехосевых станков является наличие поворотного шпинделя, перемещающегося в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Дополнительная степень свободы передвижения головки расширяет возможности обработки: шпиндель может располагаться под любым необходимым углом к поверхности заготовки.

Существуют вертикальные и горизонтальные пятикоординатные станки. Реализована возможность обработки вертикальных поверхностей, поднутрений и сверления отверстий под любым заданным углом [1].

Много деталей для аэрокосмической промышленности изготавливается из алюминия и титана. Титан является сложным для обработки металлом. Станки для обработки этих материалов должны обладать высокой жесткостью, высоким крутящим моментом, высокомоощным шпинделем с максимальными частотами вращения 10 000–15 000 об/мин и обеспечивать высокие рабочие подачи. Вертикальные пятиосевые станки обрабатывают относительно негабаритные высокоточные детали (импеллеры, лопастные ротора, лопасти и детали турбин) Горизонтальные пятиосевые станки предназначены для габаритных компонентов

различной сложности (сопла и камеры РД, детали каркаса крыла, пилоны, шпангоуты) [2].

Различают два вида 5-координатной обработки: непрерывная и позиционная обработка (обработка с индексированием).

При позиционной пятиосевой обработке (она также известна как обработка «3+2») шпиндель или стол поворачивается в ряд дискретных положений, а обработка происходит как набор операций в несколько установов. Для такой обработки применяются два различных типа станков. Прежде всего, существуют станки, представляющие собой фактически уменьшенные версии оборудования, используемого в течение многих лет в больших компаниях аэрокосмической индустрии (когда все пять степеней свободы осуществляются за счет изменения ориентации шпинделя). Но компании чаще выбирают станки с жесткой ориентацией шпинделя и с двумя дополнительными осями поворота механизма, удерживающего заготовку, за счет чего осуществляется ее наклон и/или вращение.

При непрерывной пятиосевой обработке может происходить одновременное движение по всем пяти степеням свободы. Основная задача для компаний, использующих данный метод, убедиться, что не будут происходить недопустимые столкновения инструмента с элементами станка и детали – основная сложность при обработке лопастей и корпусов ТНА [3].

В Российской двигателестроении для обработки корыта лопатки турбины ТНА применялись копировально-фрезерные станки, спинки пера лопаток обрабатывались точением или фрезерованием по копиру. Существует несколько различных схем обработки лопаток: вращающейся фрезой, или шлифовальным

кругом; неподвижной фрезой и вращающейся оправкой с закрепленной лопаткой, одновременно совершающими возвратно-поступательное движение; и другие. Для механической обработки корпусных деталей ТНА применялись токарно-револьверные станки и карусельных станках, требующие подбора специальных зажимов и держателей [4].

Большинство технологий обработки устарело, как качественно, так и экономически, так как требует обязательного участия человека в процессе, большого количества операций контроля, больших помещений и обеспечения электроэнергией нескольких станков одновременно. Внедрение технологии 5-осевой обработки с ЧПУ дает возможность применения одного обрабатывающего комплекса для проведения нескольких операций без перестановки заготовки, позволит минимизировать влияние человеческого фактора на изготовление деталей, сокращения расходов на трудовые и энергетические ресурсы, повысит качество деталей [5].

#### Библиографические ссылки

1. Перспективное оборудование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.axispanel.ru> (дата обращения: 05.09.2019).
2. Пятиосевая обработка на фрезерных станках с ЧПУ / И. В. Бондарь, Д. В. Криворучко // Серія "Нові рішення в сучасних технологіях". 09.03.2017. Вісник НТУ "ХПІ" № 7 (1229). Р. 10–17.
3. Стратегии для пятиосевого фрезерования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.directorinfo.ru/article.aspx?id=14565&iid=691> (дата обращения: 05.09.2019).
4. Горев И. И. Основы производства жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1969. 186 с.
5. Колмыков В. Производство жидкостных ракетных двигателей. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 210 с.

#### References

1. Advanced Equipment [Electronic Resource]. URL: <http://www.axispanel.ru> (access: 05.09.2019).
2. Five-axis machining on CNC milling machines / V. Bondar', D. V. Krivoruchko // Serija "Novi Risennja v sucasnih tehnologijah". 09.03.2017. Visnik NTU "HPI" № 7 (1229). P. 10–17.
3. Strategies for five-axis milling [Electronic Resource]. URL: <http://www.directorinfo.ru/article.aspx?id=14565&iid=691> (accessed: 05.09.2019).
4. Gorev I.I. Fundamentals of the production of liquid rocket engines. Moscow, Publishing House "Engineering", 1969. 186 с.
5. Kolmykov V. Production of liquid rocket engines. Moscow, Publishing House of MSTU N. E. Bauman, 2008. 210с

© Ермаков П. А., Кубриков М. В., 2019

УДК 621.454.2

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

С. А. Жежера, А. А. Неизвестных, Т. В. Тютюнников, М. А. Фёдоров, В. О. Зуев

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

*Разработаны методика расчета и программное обеспечение для расчета параметров течения и теплоотдачи в пространственных каналах агрегатов подачи. Программный комплекс позволяет проводить моделирование протекающих процессов по основным энергетическим и теплофизическим параметрам.*

*Ключевые слова: методика расчета, программный комплекс, энергетическая установка, турбонасосный агрегат, моделирование.*

**SOFTWARE COMPLEX CALCULATIONS OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL PARAMETERS  
OF THE CALCULATION OF ELEMENTS IN FLOWING PARTS OF POWER PLANTS**

S. A. Zhezhera, A. A. Neizvestnykh, T. V. Tyutyunnikov, M. A. Fedorov, V. O. Zuev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: neizv@mail.ru

*The method of calculation and software for calculation of flow parameters and heat transfer in spatial channels of feed units are developed. The software package allows to carry out modeling of the proceeding processes on the main energy and thermophysical parameters.*

*Keywords: calculation method, software complex, power plant, turbo-pump unit, modeling.*

Основным объектом исследования полостей вращения энергетических установок ЛА (летательные аппараты) являются конструктивные элементы турбонасосных агрегатов, компрессоров и газовых турбин: полость вращения между ротором и стенкой газовой турбины, подводящее устройство турбин, боковые полости вращения между рабочим колесом и стенкой корпуса лопаточного нагнетателя, полости гидродинамических уплотнений и т. п. [1–3].

Основными эксплуатационными факторами, определяемыми течением в полостях вращения агрегатов энергетических установок, являются: величина утечек (расходный К.П.Д.), распределение давления по боковым поверхностям (основной источник осевой силы), теплоотдача в стенку от закрученных потоков перегретых рабочих тел.

Разработаны алгоритмы и программа расчета параметров течения с теплоотдачей в стенку для течений характерных полостям энергетических установок ЛА. Достоверность методики расчета подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных данных исследуемых участков. Исследовались участки течения с теплоотдачей равномерного прямолинейного и вращательного течения с теплоотдачей в торцевой щели с двумя неподвижными стенками. Так

же исследовался участок, представляющий торцевую щель с неподвижной и вращающейся стенкой, вращательное течение реализуется по закону «твердого тела».

Исходными данными для алгоритмов являлись геометрические параметры полостей течения, режимные параметры и свойства рабочего тела и жидкого компонента. Алгоритм позволяет определять следующие параметры: окружную, осевую и радиальную составляющие скорости рабочего тела, полное, статическое давление, напряжение трения, толщину потери импульса, локальные и осредненные по длине и радиусу параметры коэффициентов теплоотдачи, теплового потока, критерии Стантона, Нуссельта, Рейнольдса, температуры рабочего тела и стенки со стороны рабочего тела и теплоносителя [4; 5]. На рис. 1 показано окно программы расчет параметров течения и теплоотдачи в пространственном канале при прямолинейном и вращательном течении (3D Flow), на рис. 2 – распределение температуры рабочего тела, охлаждающего компонента, по радиусу канала.

Основным преимуществом алгоритма по сравнению с алгоритмами, основанными на эмпирических зависимостях, является относительно широкая область применения.

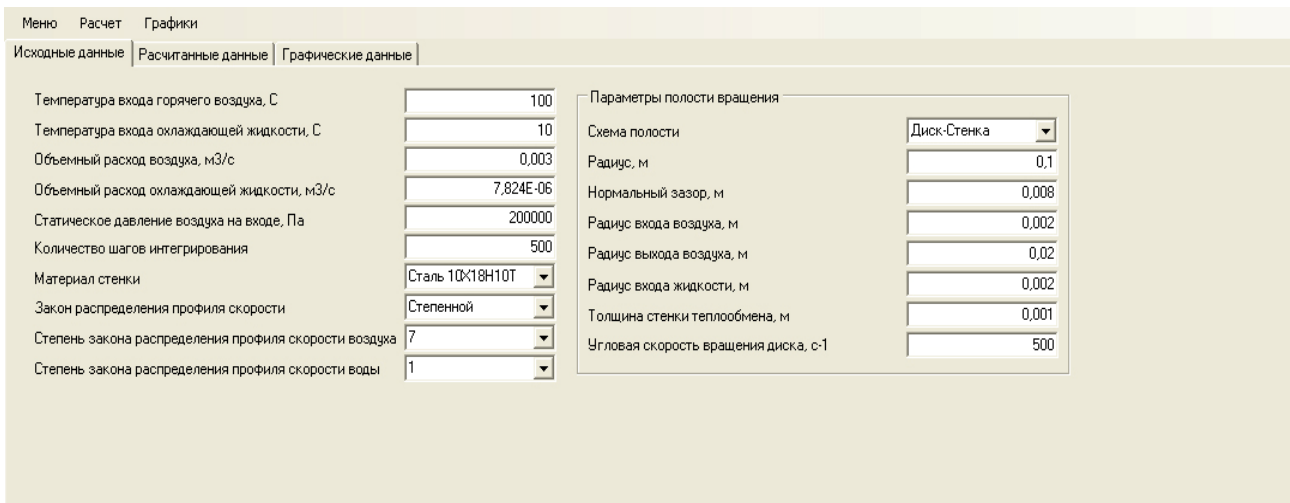


Рис. 1. Окно программы расчет параметров течения и теплоотдачи в пространственном канале при прямолинейном и вращательном течении (3D Flow)

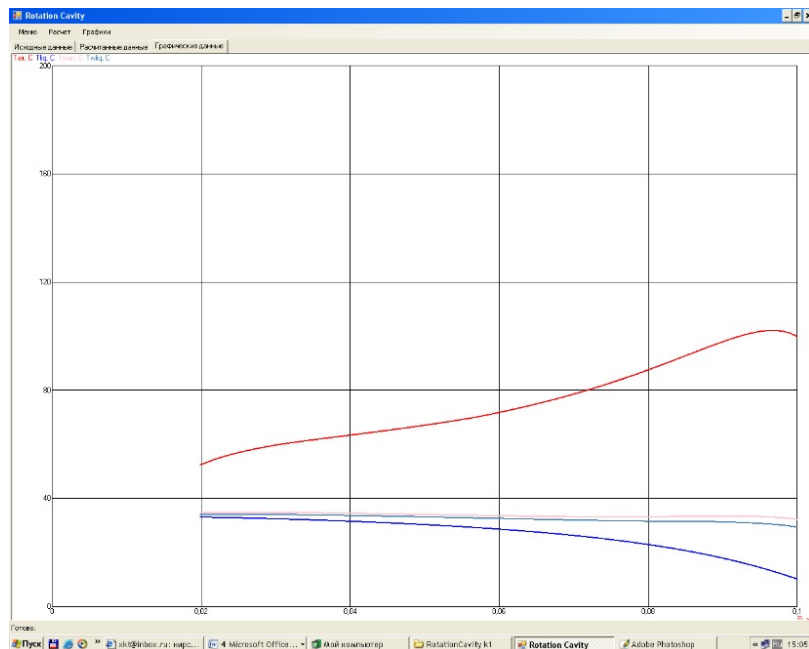


Рис. 2. Распределение температуры рабочего тела и охлаждающего компонента, по радиусу проточной части

Алгоритм расчета течения с теплоотдачей в стенку реализован в программное обеспечение, которое позволяет рассчитывать полости течения различной формы, строить двумерные семейства характеристик различных параметров потока в зависимости от геометрических и режимных параметров рабочего тела.

Методика расчета и программное обеспечение «Расчет течений с учетом теплоотдачи в элементах турбонасосных агрегатов» зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, на что получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616816 от 29.05.2019.

### Библиографические ссылки

1. Толстопятов М. И., Зуев А. А. Расчет теплового состояния дисков газовых турбин ЖРД // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. С. 177–179.
2. Толстопятов М. И., Зуев А. А. К расчету параметров потока с учётом теплоотдачи в полостях газовых турбин // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. С. 162–163.
3. Зуев А. А., Толстопятов М. И. Теплоотдача в камере газовой турбины ЖРД // Вестник СибГАУ. 2013. № 4(50). С. 172–176.
4. Толщина потери энергии на участке нестабилизированного течения при  $Pr$  меньше 1 / А. А. Кишкин, В. О. Фальков, А. А. Зуев, М. И. Толстопятов // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. С. 105–106.

5. Шлоссер Е. В., Зуев А. А. Исследование течения с учётом теплоотдачи в полостях вращения агрегатов энергетических установок летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2011. Т. 1. С. 146–147.

#### References

1. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A. [Calculation of the thermal state of the disk gas turbines rocket engines]. Reshetnevskiyе chteniya. 2015. Vol. 1. P. 177–179.

2. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A. [To the calculation of flow parameters with account of heat transfer in the cavities of gas turbines]. Reshetnevskiyе chteniya. 2014. Vol. 1. P. 162–163.

3. Zuev A. A., Tolstopyatov M. I. [Heat Transfer in the cavity of the gas turbine LRD] // Vestnik SibGAU. 2013. № 4(50). P. 172–176.

4. Kishkin A. A., Falkov V. O., Zuev A. A., Tolstopyatov M. I. [The thickness of the energy loss in the unstabilized phase currents  $Pr$  is less than 1] // Reshetnevskiyе chteniya. 2012. Vol. 1. P. 105–106.

5. Schlosser E. V., Zuev A. A. [The study of the flow taking into account heat transfer in the cavities of rotation of the units of power plants of aircraft] // Reshetnevskiyе chteniya. 2011. Vol. 1. P. 146–147.

© Жежера С. А., Неизвестных А. А.,  
Тютюнников Т. В., Фёдоров М. А., Зуев В. О., 2019

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

## СПОСОБ ВЫБОРА ЗАКОНОВ ТРЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КАНАЛАХ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН ЖРД

Д. А. Жуйков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: d\_zhuikov@sibsau.ru

*Рассматривается способ выбора законов трения при расчете гидравлических потерь в каналах лопаточных машин турбонасосных агрегатов ЖРД.*

*Ключевые слова: ЖРД, турбонасосный агрегат, гидравлические потери, напряжения трения, лопаточные машины, пограничный слой.*

## THE METHOD FOR SELECTING THE LAWS OF FRICTION IN THE CALCULATION OF HYDRAULIC LOSSES IN THE CHANNELS OF LPRE TURBOMACHINERY

D. A. Zhuikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: d\_zhuikov@sibsau.ru

*The method of choice of laws of friction in the calculation of hydraulic losses in channels of Turbomachinery turbopump units LPRE is considered.*

*Keywords: LPRE, turbopump unit, hydraulic loss, tension friction, turbomachinery, boundary layer.*

Один из путей совершенствования жидкостных ракетных двигателей – это повышение энергоэффективности двигателя в части самого энергонагруженного узла турбонасосного агрегата (ТНА). Ключевым параметром, характеризующим энергоэффективность агрегата, является гидравлический КПД. Существующие на сегодняшний день методики расчета гидравлических потерь являются эмпирическими или полупирическими [1–3].

На основе струйной теории ранее без учета трения получено поле скоростей ядра потока в межлопаточном канале центробежного колеса турбонасосного агрегата [4; 5]. Для корректного определения поля скоростей и давлений в канале необходимо определять напряжения трения на поверхностях канала. При решении этой задачи применяется подход разбиения течения в канале на основной без вязкостного потока и течение в тонком пограничном слое (ПС), где наблюдается проявление вязкости рабочей жидкости и выделяются напряжения трения. Течение в межлопаточных каналах и полостях вращения может протекать как с наличием ядра потока, так и со слиянием пограничных слоев, при котором отсутствует ядро потока.

Для решения задачи определения гидравлических потерь необходимо определить напряжения трения, которые часто для турбулентного режима течения задаются в виде закона трения [6].

$$Tr = \frac{\tau_0}{\rho U^2} = C \left( \frac{U \delta^{**}}{\nu} \right)^{-0,25}, \quad (1)$$

где  $U$  – скорость внешнего течения (скорость «безвязкостного» ядра потока);  $C = 0,0125$  [2] или  $C = 0,0128$  [6];  $\delta^{**}$  – толщина потери импульса ПС;  $\rho, \nu$  – плотность и вязкость жидкости.

Этот закон (1) вытекает из решения интегрального уравнения импульсов ПС Кармана для плоского течения несжимаемой жидкости [6]

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} = -(2 + H) \frac{\delta^{**}}{U} \frac{dU}{dx} + Tr. \quad (2)$$

Однако решение проводится на основе допущений: слияние ПС; течения с постоянной скоростью  $dU/dx = 0$ ; степенной профиль скорости потока в ПС с показателем степени 1/7; закона трения Блазиуса.

Реальные течения в каналах и полостях агрегатов ЖРД имеют как турбулентный, так и ламинарный характер, как при слившихся ПС, так и без слияния ПС с ядром потока. Большинство каналов в агрегатах ЖРД имеют сложную форму обтекания и длину сравнимой с гидравлическим диаметром, что не позволяет на взаимных поверхностях канала развиваться пограничным слоям до их слияния. Кроме того, закон сопротивления трения Блазиуса имеет ограниченный диапазон применения по числу Рейнольдса  $4 \cdot 10^3 < Re < 10^5$ , что существенно ограничивает применение выражения (1). Так на входе в канал толщина ПС стремится к нулю и имеет место ламинарный характер течения в ПС, то необходимо применять ламинарный закон сопротивления трения.

В результате закон трения (1) имеет достаточно узкое применение.

Еще один не мало важный фактор, это то что при наличии ядра потока, который всегда имеет место на начальном участке, расширяющемся и во вращающемся канале, производная скорости ядра потока не равна нулю  $dU/dx \neq 0$ , что означает применение выражения (1) при наличии ядра потока и градиента давления для закрытых каналов снижает область корректного применения. А так как внешняя скорость потока  $U$  изменяется, то необходимо определять дифференциал скорости в интегральном соотношении Кармана (2), который в свою очередь зависит от толщины ПС. Поэтому необходимо численно решать соотношение Кармана (2) с учетом законов сопротивления трения  $\lambda = f(\text{Re})$  (ламинарного, Блазиуса, Прандтля) и точно определить точку перехода ламинарного течения в ПС в турбулентное.

Таким образом, для корректного определения гидравлических потерь в каналах ТНА ЖРД необходимо численно решать систему уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости и пограничного слоя с учетом геометрии канала и характера режима течения.

#### Библиографические ссылки

1. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. М. : Машиностроение, 1986. 376 с.
2. Степанов Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М. : Физматгиз, 1962. 512 с.
3. К расчету пространственного пограничного слоя при развороте потока в круговом секторе / Д. В. Черненко, Е. В. Черненко, А. А. Зувев и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки / № 1. ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск, 2009. 140 с.
4. Черненко В. В., Жуйков Д. А., Каменюк О. В. Численное моделирование течения в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф., посвящ. акад. М. Ф. Решетневу (13 ноября 2013, г. Красноярск) : в 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С.153–154.
5. Жуйков Д. А., Толстопятов М. И., Буц К. Е. Численное моделирование течения в межлопаточном неподвижном канале центробежного насоса ЖРД // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : Междунар. молодежная научная конф. (16–18 ноября 2016, г. Томск) : материалы конференции / под общ. ред. М. Ю. Орлова. Томск, 2016. С. 38–39.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969. 744 с.

#### References

1. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZhRD [Theory and calculation of LPRE]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 376 с.
2. Stepanov G. Yu. Gidrodinamika reshetok turbomashin [Hydrodynamics of lattices of turbomachines]. Moscow, Fizmatgiz, 1962. 512 с.
3. [To the calculation of the spatial boundary layer during flow turning in a circular sector] / D. V. Chernenko, E. V. Chernenko, A. A. Zuev et al. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. severokavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki / № 1. YuRGTU (NPI). Novocherkassk, 2009. С. 15–18 (In Russ.).
4. Chernenko V. V., Zhuykov D. A., Kamenyuk O. V. [Numerical simulation of the flow in the interscapular channel of the impeller of a centrifugal pump] // Reshetnevskie chteniya : materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati akademika M. F. Reshetneva (13 noyabrya 2013, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch. Ch. 1 / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013. С. 153–154 (In Russ.).
5. Zhuykov D. A., Tolstopyatov M. I., Buts K. E. [Numerical simulation of the flow in the interscapular fixed channel of a centrifugal LRE pump] // Aktual'nye problemy sovremennoy mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoy mekhaniki : Mezhdunar. molodezhnaya nauchnaya konf. (16–18 noyabrya 2016 g. Tomsk) : materialy conf. Tomsk, 2016. С. 38–39 (In Russ.).
6. Shlikhting G. Teoriya pogranchnogo sloya [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka, 1969. 744 с.

© Жуйков Д. А., 2019

УДК 621.454.2

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЛОКАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

А. А. Зуев<sup>1</sup>, А. А. Арнольд<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: dla2011@inbox.ru

*Предложена модель распределения динамического и температурного пространственных пограничных слоев с конвективной составляющей, необходимая для аналитического определения локального коэффициента теплоотдачи в полостях вращения турбин ЖРД.*

*Ключевые слова: температурный пограничный слой, коэффициент теплоотдачи, интегральное соотношение уравнения энергии, проточная часть турбонасосного агрегата.*

## ANALYTICAL APPROACH FOR DETERMINATION OF LOCAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN BOUNDARY CONDITIONS OF ROTATION CAVITIES

A. A. Zuev<sup>1</sup>, A. A. Arngold<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: dla2011@inbox.ru

*The proposed distribution model spatial dynamic and thermal boundary layers with the convective component required for the analytical determination of local heat transfer coefficient in the cavities of rotation of turbines of liquid propellant rocket engines.*

*Keywords: temperature boundary layer, heat transfer coefficient, integral ratio of the energy equation, flow part of the turbo-pump unit.*

**Введение.** Учет особенностей теплоотдачи в проточных частях турбонасосных агрегатов (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является актуальной задачей. В настоящее время учет особенностей течения с теплоотдачей при реализации потенциального и вихревого вращательного течения в проточных частях в основном осуществляется следующими методами: с использованием эмпирических уравнений, численными и аналитическими методами решения дифференциальных уравнений в частных производных [1].

**Объект исследования.** При проектировании проточных частей узлов и агрегатов ТНА ЖРД необходимо учитывать изменение температуры потока рабочего тела по длине рабочего канала, так как параметр вязкости является функцией температуры и определяет режим течения и как следствие потери, в частности дисковое трение и гидродинамические потери в проточной части.

В связи с этим моделирование энергетических параметров ТНА ЖРД, представляет актуальную научно-техническую задачу.

Для случая течения несжимаемой жидкости необходимо и достаточно совместного решения уравнений движения и энергии в граничных условиях простран-

ственного пограничного слоя [2], для сжимаемой жидкости необходимо дополнение системы уравнением состояния.

Основным объектом исследования, где реализуется потенциальное и вихревое вращательное течение, являются конструктивные элементы проточных частей газовых турбин ЖРД: полости между статором и рабочим колесом [3].

**Закон теплообмена турбулентного течения температурного пространственного пограничного слоя. Интегральное соотношение уравнения энергии.**

При ( $Pr < 1$ ), толщина динамического пограничного слоя находится ниже толщины температурного пограничного слоя, т. е.  $\delta < \delta_t$ . Примем, что в границе динамического пограничного слоя изменение температуры происходит за счет переноса скорости, а за его границей – только за счет молекулярной теплопроводности. Соответственно, термическое сопротивление присутствует по всей толщине температурного пограничного слоя.

С учетом вышесказанного, выражение толщины потери энергии температурного пограничного слоя [4] для рассматриваемой модели распределения температурного и динамического пограничных слоев, с



принятой моделью разбиения на два характерных участка интегрирования:

$$\delta_{i\varphi}^{**} = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left( 1 - \frac{T - T_0}{T_{\delta} - T_0} \right) dy + \int_{\delta}^{\delta_i} \frac{u}{U} \left( 1 - \frac{T - T_0}{T_{\delta} - T_0} \right) dy. \quad (1)$$

С применением уравнения (1) становится возможным определить вид закона теплообмена для случая  $Pr < 1$ . Для дальнейшего использования уравнение (1) необходимо проинтегрировать с учетом принятых законов распределения профиля скорости в пограничном слое. В результате преобразований получим:

$$\begin{aligned} \delta_{i\varphi}^{**} &= \frac{m\delta}{(m+1)(m+2)} - \frac{\delta\lambda(x-1)^2}{2x^2} = \\ &= \delta \left( \frac{m}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x^2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для закона теплообмена в виде критерия Стантона, необходимо определить производную температурного пограничного слоя на стенке поверхности теплообмена. Так как производная не существует формально при  $m < 1$ , определяем ее из принятой двухслойной модели турбулентности с ламинарным подслоем:

$$\begin{aligned} St &= \frac{\lambda}{\rho C_p U^{\frac{2}{m+1}}} \cdot \left( \frac{\frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x}}{\alpha_{\lambda}^{m-1} \nu^{\frac{m-1}{2}}} \right)^{\frac{2}{m+1}} \times \\ &\quad \times \frac{1}{(\delta_{i\varphi}^{**})^{\frac{2}{m+1}}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для практической реализации закона теплообмена необходимо определить значение коэффициента ламинарного подслоя турбулентного профиля распределения температурного пограничного слоя  $\alpha_{\lambda}$ .

$$\alpha_{\lambda} = 12,5496 Pr^{\frac{1}{18}}.$$

Запишем интегральное соотношение уравнения энергии ППС с учетом закона теплообмена, учитывая, что для вращательного течения, реализующегося в полостях энергетических и энергосиловых агрегатов, линия тока представляет собой кольцевую линию

$$\begin{aligned} J\varepsilon \frac{\partial}{\partial R} \delta_{i\varphi}^{**} + \frac{J\varepsilon}{R} \delta_{i\varphi}^{**} &= \\ &= \frac{\lambda}{\rho C_p U^{\frac{2}{m+1}}} \left( \frac{\frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x}}{\alpha_{\lambda}^{m-1} \nu^{\frac{m-1}{2}}} \right)^{\frac{2}{m+1}} \times \\ &\quad \times \frac{1}{(\delta_{i\varphi}^{**})^{\frac{2}{m+1}}} - \frac{\tau_{\varphi 0} (1 + \varepsilon^2)}{\rho C_p (T_{\delta} - T_0)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Интегральное соотношение уравнения энергии (4) необходимо для записи и определения толщины поте

ри энергии температурного пространственного пограничного слоя, входящей в выражение для определения локального коэффициента теплоотдачи в виде критерия Стантона.

Локальный коэффициент теплоотдачи в виде критерия Стантона для вращательного течения по закону твердого тела для случая  $Pr < 1$ :

$$\begin{aligned} St &= \frac{1}{\frac{m+1}{Pr^{m+3}}} \left( \frac{2J\varepsilon}{\alpha_{\lambda}^{m-1} Re} \frac{(m+1)}{(m+3)} \right)^{\frac{2}{m+3}} \times \\ &\quad \times \left( \frac{\frac{xm}{(m+1)(m+2)} - \frac{\lambda(x-1)^2}{2x}}{\alpha_{\lambda}^{m-1} \nu^{\frac{m-1}{2}}} \right)^{\frac{2(m+3)-4}{(m+1)(m+3)}}. \end{aligned}$$

### Библиографические ссылки

1. Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И., Федяевский К. К. Гидромеханика. Л. : Судостроение, 1982. 456 с.
2. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя с конвективной составляющей в полостях вращения ТНА ЖРД / А. А. Зуев, В. Ю. Пиунов, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19, № 2. С. 30–44.
3. Кишкин А. А., Зуев А. А., Леонов В. П. Локальная теплоотдача в граничных условиях турбомашин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1(658). С. 3–10.
4. Зуев А. А., Назаров В. П., Арнгольд А. А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.

### References

1. Voiskunski J. I., Faddeev, Y. I., Fedyaevsky K. K. *Gidromekhanika* [Hydromechanics]. Leningrad : Shipbuilding, 1982. 456 p.
2. Determination of the local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the rotation cavities of the LRE turbopump / A. A. Zuev, V. Yu. Piunov, V. P. Nazarov, A. A. Arngold // *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye*. 2019, Vol. 19, № 2. P. 30-44.
3. Kishkin A. A., Zuev A. A., Leonov V. P. [Local heat transfer in the boundary conditions of turbomachines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2015, № (658), P. 3–10.
4. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A. [The local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the cavities of rotation of the gas turbines]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2019. Vol. 26, № 2. P. 99–115.

УДК 621.454.2

## ДИСКОВОЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ ТНА ЖРД

А. А. Зуев<sup>1</sup>, А. А. Арнгольд<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: dla2011@inbox.ru

*Представлены результаты аналитического исследования для определения расчетных зависимостей и коэффициентов потерь дискового трения.*

*Ключевые слова: дисковое трение, потери энергии, К.П.Д., баланс мощности, методика проектирования, турбонасосный агрегат, жидкостный ракетный двигатель, мощность.*

## DISC FRICTION IN DETERMINING THE POWER BALANCE OF LRE TNA

A. A. Zuev<sup>1</sup>, A. A. Arngold<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: dla2011@inbox.ru

*The results of an analytical study to determine the calculated dependences of the coefficients of disc friction losses are presented.*

*Keywords: disk friction, energy loss, efficiency, power balance, design procedure, turbopump, liquid rocket engine, power.*

**Введение.** При проектировании современных ракетных двигателей и переходе на экологически чистые компоненты топлива существует тенденция роста частоты вращения ротора ТНА. Потери мощности на дисковое трение, особенно при больших частотах вращения, могут составлять порядка 3–7 % [1].

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, проведенные различными авторами в диапазоне геометрических и эксплуатационных параметров течений в зазоре между ротором и статором, обеспечивают целое поле расходящихся значений [2; 3]. Некоторые методики расчета момента сопротивления имеют различные недостатки, связанные в первую очередь с использованием эмпирических коэффициентов, и не учитывают наличие радиальной составляющей абсолютной скорости в боковой полости.

**Дисковое трение.** Исходя из баланса мощностей, где полезная мощность центробежного насоса определяется как [5]:

$$N_{\Pi} = N_{\text{ПОТ}} - N_{\text{мех}} - N_{\text{д}} - N_{\text{ут}} - N_{\text{гидр}}$$

рассмотрим определение коэффициента дискового трения с учетом увеличения частоты вращения ротора ТНА ЖРД при турбулентном течении в канале между вращающимся диском рабочего колеса и корпусом ( $Re > 10^5$ ).

При рассмотрении случая течения потока рабочего тела в канале между вращающимся диском и непод-

вижной стенкой, необходимо учитывать угловую скорость ядра потока и диска. С учетом окружной составляющей течения на стенке

$$U_{\text{ст}} = \omega_{\text{я}} R,$$

тогда окружное напряжение трения на стенке определится как

$$\tau_{0\alpha}^{\text{ст}} = 0,01256\rho(\omega_{\text{я}}R)^2 \left( \frac{\omega_{\text{я}}R}{v} \frac{m\delta}{(m+1)(m+2)} \right)^{-0,25},$$

где  $m$  – степень профиля скорости в динамическом пограничном слое;  $\delta$  – толщина пограничного слоя;  $R$  – радиус диска ротора.

С учетом окружной составляющей течения на диске

$$U_{\text{д}} = (\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{я}})R,$$

окружное напряжение трения на диске

$$\tau_{0\alpha}^{\text{д}} = 0,01256\rho [(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{я}})R]^2 \times \left( \frac{(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{я}})R}{v} \frac{m\delta}{(m+1)(m+2)} \right)^{-0,25}.$$

Рассматриваемый случай течения относится к вращательному течению по закону «твердого тела»  $\frac{U}{R} = \omega = \text{const}$ .

Определим толщину потери импульса в окружном направлении с произвольной степенью профиля для

стенки и диска, проведя преобразования получим толщину потери импульса в окружном направлении на стенке и диске. С учетом полученных выражений для толщин потери импульса в окружном направлении определим касательные напряжения трения на стенке и диске.

Учитывая, что касательное напряжение трения дисковых потерь определяется как

$$\tau = C_{\text{трД}} \rho \frac{U^2}{2},$$

определим выражение для коэффициента трения для стенки и диска рабочего колеса, найдем коэффициенты трения для стенки и диска в окружном направлении.

Учтем, что при определении дисковых потерь учитывают трение диска и стенки [3], тогда определим коэффициент потерь дискового трения

$$C_M = C_{\text{тра}}^{\text{ст}} + C_{\text{тра}}^{\text{д}}.$$

Затем определим зависимость угловой скорости течения ядра потока от радиуса. Определение аналитической зависимости угловой скорости ядра потока  $\omega_{\text{я}}$  от угловой скорости диска  $\omega_{\text{д}}$  представляет сложную задачу. В первом приближении, для определения коэффициента дискового трения, для практически важных случаев можно принять  $\omega_{\text{я}} = 0,5\omega_{\text{д}}$ , тогда

$$C_M = \frac{1}{(0,5 \text{Re}_{\text{д}})^5} \left( \frac{0,02722}{A} + \frac{0,048515}{B} \right),$$

где

$$A = \left( \frac{18m^3 + 99m^2 - 171m}{m^3 + 18m^2 + 105m + 200} \right)^{\frac{1}{10}} \times \left( \frac{7m^3 + 76m^2 + 253m + 240}{18m^2 + 72m + 54} \right)^{\frac{1}{5}},$$

$$B = \left[ \frac{(m+5)(7m^2 + 41m + 48)}{\sqrt{\frac{(m+3)(m+5)(m+8)}{9m(2m^2 + 9m + 5)}}(m+1)(m+3)} \right]^{\frac{1}{5}}.$$

Для анализа полученной зависимости и сравнения с результатами полученных другими авторами построим график.

**Выводы.** В результате учета распределения динамического пограничного слоя в зависимости от обо-

ротом ротора (степени турбулизации профиля скорости  $m$ ), уточнены выражения для определения коэффициентов трения. Уточненные выражения для определения коэффициентов трения согласуются с зависимостями полученными другими авторами и имеют более широкий доверительный интервал использования.

#### Библиографические ссылки

1. Дисковое трение при определении баланса мощностей ТНА ЖРД / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд, И. М. Петров // Вестник ПНИПУ. «Аэрокосмическая техника». 2019. № 57. С. 17–31.
2. Von Karman, Th., Uber Laminare und Turbulente Reibung, Zeitschrift fiir Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM). 1921. Vol. 1, № 4. P. 233–251.
3. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М. : Физматгиз, 1960. 260 с.
4. Jacques R., Le Quere P., Daube O. Axisymmetric Numerical Simulations of Turbulent Flow in Rotor- Stator Enclosures // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2002. Vol. 23, № 4. P. 381–397.
5. Методика определения дискового трения малорасходных центробежных насосов / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд, И. М. Петров // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20. № 2. С. 219–227.

#### References

1. Disk friction in determining the balance of power turbopump rocket engine / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, A. A. Arngold, I. M. Petrov // Vestnik PNIPIU. «Aerokosmicheskaya tekhnika». 2019. № 57. P. 17–31.
2. Von Karman, Th., Uber Laminare und Turbulente Reibung, Zeitschrift fiir Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM). 1921. Vol. 1, № 4. P. 233–251.
3. Dorfman L. A. *Gidrodinamicheskoye soprotivleniye i teplootdacha vrashchayushchikhsya tel* [Hydrodynamic resistance and heat transfer of rotating bodies]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 260 p.
4. Jacques R., Le Quere P., Daube O. Axisymmetric Numerical Simulations of Turbulent Flow in Rotor- Stator Enclosures // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2002. Vol. 23, № 4. P. 381–397.
5. The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, A. A. Arngold, I. M. Petrov // Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy. 2019. Vol. 20. № 2. P. 219–227.

© Зуев А. А., Арнгольд А. А., 2019

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю. В. Конозобкин, Я. Ю. Ледков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: nazarovo1033wrest@mail.ru

*Рассмотрены мероприятия по повышению качества внутренних полостей турбонасосного агрегата. Актуальность обусловлена увеличением прочностных характеристик корпусов ТНА.*

*Ключевые слова: турбонасосный агрегат, корпус, жидкостный ракетный двигатель.*

## METHODS OF IMPROVING THE QUALITY OF THE INTERNAL CAVITIES OF THE TURBO-PUMP UNIT OF THE LIQUID ROCKET ENGINE

Yu. V. Konozobkin, Ya. Yu. Ledkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nazarovo1033wrest@mail.ru

*In this paper, we consider measures to improve the quality of the internal cavities of the turbo-pump unit. The relevance is due to the increase in the strength characteristics of TNA bodies.*

*Keywords: turbo-pump assembly, body, liquid-propellant rocket engine.*

Немаловажной проблемой конструирования корпусов ТНА является уменьшение шероховатости их поверхностей [4]. Одним из методов обработки является виброобработка. Несмотря на множество положительных качеств, метод вибрационной обработки может оказаться неудовлетворительным по причинам невозможности обработки труднодоступных поверхностей и получения высоких классов шероховатости. Для реализации обработки фасонных поверхностей в закрытых крупногабаритных деталях корпуса ТНА было спроектировано приспособление для жидкостно-абразивной обработки. Преимуществом оборудования данного класса является сокращение времени, затрачиваемого на обработку [2].

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) широко применяется для очистки поверхности, снижения шероховатости и снятия заусенцев на изделиях, изготовленных из различных металлических материалов. ЭПО является безопасной и более производительной технологией по сравнению с альтернативными видами (электрохимическая, механическая обработка) [1].

Сущность процесса заключается в следующем: вокруг поверхности обрабатываемой детали-анода, погруженной в электролит, происходит локальное пленочное вскипание электролита и образование стабильной парогазовой оболочки (ПГО). Сформировавшаяся таким образом оболочка из пара и газа отжимает электролит от поверхности детали и значительно увеличивает электрическое сопротивление в цепи деталь – электролит. При этом сила тока резко уменьшается, и напряжение источника питания почти полно-

стью прикладывается к образовавшейся парогазовой оболочке. Таким образом, из-за высокой локальной напряженности электрического поля возникает частичная ионизация газа с протеканием электрического тока через парогазовую оболочку в виде импульсных и диффузных электрических разрядов [5].

При проведении экспериментальных исследований на образцах-иммитаторах, установлено, что метод электролитно-плазменной обработки с применением устройства для обработки внутренних пространственно-сложных поверхностей различной кривизны корпусных деталей центробежных насосов ЖРД является наиболее эффективным и удовлетворяет всем требованиям при производстве деталей для создания кислородно-углеводородных жидкостных ракетных двигателей новых схем [3].

### Библиографические ссылки

1. Крушенко Г. Г. Эволюция технологии изготовления корпусов насосов турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя // Вестник СибГАУ. 2014. С. 174–179.
2. Крушенко Г. Г., Платонов О. А., Решетникова С. Н. Повышение плотности деталей двигателей летательных аппаратов, отливаемых из алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. С. 148–150.
3. Володин А. Ю. Технологические особенности электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей корпусов ТНА ЖРД // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. С. 129–131.

4. Сосков Е. С., Жуковская И. В., Сысоев С. К. Проблемы уменьшения шероховатости в закрытых крупногабаритных полостях // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. С. 23–24.

5. Белоусов А. И., Балякин В. Б., Люлев А. И. Снижение виброактивности турбонасосных агрегатов регулированием жесткости опор // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. 2003. С. 383–391.

#### References

1. Krushenko G. G. Evolution of manufacturing technology of pump housings of turbo-pump unit of liquid rocket engine // Vestnik SibGAU. 2014. P. 174–179.

2. Krushenko G. G., Platonov O. A., Reshetnikova S. N. Increasing the density of aircraft engine parts cast from

aluminum alloys // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2017. P. 148–150.

3. Volodin A. Yu. Technological features of electrolytic-plasma treatment of internal surfaces of LRE TNA hulls // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2017. P. 129–131.

4. Soskov E. S., Zhukoskaya I. V., Sisoev S. K. Problems of roughness reduction in closed large cavities // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2011. P. 23–24.

5. Belousov A. I., Balyakin V. B., Lyulev A. I. The reduction of vibratory activity of turbo-pumps regulation of the rigidity of the supports // Problems and prospects of engine development. 2003. P. 383–391.

© Конозобкин Ю. В., Ледков Я. Ю., 2019

УДК 62-9

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЛЕТЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧАСТКОМ, СОДЕРЖАЩИМ КРЕСТОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Д. А. Лотарев, С. А. Раткин

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

*Рассмотрена возможность улучшения технологии производства профильных труб из композиционных материалов и более качественных по их характеристикам.*

*Ключевые слова: композиционные материалы, ракетно-космическая техника, плетение профильных труб, коклюшечная машина, углеволокно.*

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF WEAVING PROFILE PIPES FROM COMPOSITE MATERIALS WITH A SECTION CONTAINING A CROSS COMPOUND

D. A. Lotarev, S. A. Ratkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: thelotard@gmail.com

*The possibility of improving the technology for the production of shaped pipes from composite materials and better in their characteristics is considered.*

*Keywords: composite materials, rocket and space technology, weaving of profile pipes, bobbin machine, carbon fiber.*

Композиционные материалы получили широкое применение в ракетно-космической технике. Для получения прочных каркасных конструкций применяют композитные профильные трубы [1]. При создании объемных элементов требуется применение крестовых неразъемных соединений, представляющих из себя единый элемент, состоящий из двух труб, слитых в одну деталь. Для получения таких соединений используется сложный технологический процесс укладки армирующего материала и пропитывается связующим материалом. Большинство технологических операций при производстве композитных труб сложной конфигурации требует применение ручного труда, что существенно снижает качество получаемых элементов. Также это сильно влияет на механические характеристики материала. Человек не способен контролировать натяжку композитной ленты по всей траектории укладки, что приводит к короблению композита после полимеризации [2].

Можно выделить несколько основных проблем:

- применение ручного труда при укладке композитного материала;
- невозможность контролировать натяжку композитного материала;
- низкая производительность и повторяемость получаемых изделий.

Благодаря комбинации положительных характеристик углеволокна и полимеров, углепластиковые трубы получили практически безграничные перспективы

применения – от прокладки нефтехимических трасс до применения в ракетно-космической технике [3].

Композитные трубы обладают рядом преимуществ:

Малый вес. Благодаря легкости, облегчаются конструкторские элементы.

Коррозийная стойкость. Составляющие композита имеют низкую реакционную способность, поэтому не подвергаются электрохимической коррозии.

Высокие механические свойства. Абсолютный предел прочности композита уступает показателю стали, но параметр удельной прочности значительно превосходит термопластичные полимеры (ПВХ, ПНД).

Атмосферостойкость. Диапазон граничных температур ( $-60...+80$  °С), обработка труб защитным слоем из гелькоута обеспечивает невосприимчивость к лучам УФ-диапазона.

Самая популярная техника получения композитных труб – непрерывная намотка. Труба создается при переменном чередовании оправки углеволокном с полимерами с процессами отверждения. Производственный метод имеет несколько подвидов.

Спирально-кольцевая техника [4]. Укладчиком волокон является специальное кольцо, по окружности которого расположены фильтры с нитями. Рабочий элемент непрерывно перемещается вдоль оси движущейся оправки и распределяет волокна по ходу винтовых линий.

Спирально-ленточная намотка. Техника аналогична предыдущей, отличие – укладчик, который подает узкую ленту из волокон. Плотный армирующий слой достигается увеличением количества проходов.

Продольно-поперечный метод. Осуществляется непрерывная намотка – укладчик размещает продольные и поперечные волокна одновременно. Реверсное движение отсутствует.

Косослойная поперечно-продольная технология. При косослойной намотке укладчик выводит «вуаль», состоящую из пучка связующих нитей. Лента подается на оправу под незначительным углом внахлест с предыдущим витком – образуется кольцевая арматура. По завершению обработки всей оправки волокна обкатываются роликами – остатки связующих полимеров удаляются, армирующее покрытие уплотняется.

Предлагаемая нами технология берет за основу коклюшечные машины. Процесс плетения заключается в получении труб из двух систем «потоков» нитей, взаимно перекрывающих друг друга под тем или иным углом [5].

Композиционные материалы получили широкое применение в ракетно-космической технике. Для получения прочных анизотридных конструкций применяют композитные профильные трубы. При создании объемных элементов требуется применение крестовых неразъемных соединений. Для получения таких соединений используется сложный технологический процесс укладки армирующего материала из углеволокна и пропитка связующим материалом с применением вакуумных мешков и высокоточных оправок. Зачастую большинство данных операций используют ручной труд, что существенно снижает качество и повторяемость механических характеристик получаемых элементов.

Применение разрабатываемой технологии позволяет получить данный вид конструкции с применением роботизированной коклюшечной машины. Существенно ускорив процесс и достигнуть приемлемой повторяемости получаемых элементов. В перспективе полученная технология позволит создавать объемные трубные кольцевые конструкции в космических условиях. Выращивая силовой каркас можно создавать целые космические станции в автоматическом режиме.

Развитие данной технологии создает отдельное направление для НИОКР, позволяющее достичь увеличения выпуска трубных конструкций путем совершенствования процессов роботизированной намотки профильных труб.

### Библиографические ссылки

1. Производство композиционных материалов в машиностроении : учеб. пособие / В. Г. Шибakov, В. И. Калашников, Ю. А. Соколова [и др.]. М. : KnoРус, 2008. 95 с.
2. Колесов С. Н., Колесов И. С. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 2007. 535 с.
3. Рогов В. А. Конструкционные и функциональные материалы современного машиностроения. М. : Масштаб, 2006. 84 с.
4. Худoley Ю. Л. Техника и технология изготовления двуслойных спиральных конструкций металлокорда 2+7 и 3+9 с различными шагами свивки по слоям в одну технологическую операцию // Литье и металлургия. 2001. № 3. С. 172–175.
5. Молодцов Г. А., Биткин Б. Е., Симонов В. Ф., Урмансов Ф. Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 2000. 352 с.

### References

1. *Proizvodstvo kompozicionnyh materialov v mashinostroenii* [Production of composite materials in mechanical engineering] / V. G. Shibakov, V. I. Kalashnikov, Ju. A. Sokolova [et al.]. Moscow, KnoРус Publ., 2008. 95 p.
2. Kolesov S. N., Kolesov I. S. *Materialovedenie i tehnologija konstrukcionnyh materialov* [Materials science and technology of structural materials] *uchebnik dlja vuzov* [a textbook for universities]. 2 *izdanie pererabotannoe i dopolnennoe* [2nd edition revised and supplemented]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 535 p.
3. Rogov V. A. *Konstrukcionnye i funkcional'nye materialy sovremennogo mashinostroenija* [Structural and functional materials of modern engineering]. Moscow, Masshtab Publ., 2006. 84 p.
4. Hudolej Ju. L. [Technique and manufacturing technology of two-layer spiral steel cord structures 2 + 7 and 3 + 9 with different lay-up steps in layers in one technological operation] // *Lit'e i metallurgija*. 2001. № 3. P. 172–175 (in Russ.).
5. Molodcov G. A., Bitkin B. E., Simonov V. F., Urmansov F. F. *Formostabil'nye i intellektual'nye konstrukcii iz kompozicionnyh materialov* [Form-stable and intelligent composite structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 352 p.

© Лотарев Д. А., Раткин С. А., 2019

## УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В. П. Назаров, Д. А. Савчин, Л. П. Назарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: savchin.dim@yandex.ru

*Рассмотрена методика ускоренных кавитационных испытаний шнекоцентробежных насосов. Проведено сравнение существующей и предлагаемой методик.*

*Ключевые слова: кавитация, центробежный насос, основные характеристики, кавитационные испытания, ускоренный метод испытаний.*

## THE ACCURACY INCREASING IN THE OBTAINING OF THE CENTRIFUGAL PUMP CAVITATION CHARACTERISTIC

V. P. Nazarov, D. A. Savchin, L. P. Nazarova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: savchin.dim@yandex.ru

*The paper describes the accelerated cavitation tests of rocket engine pumps and compares the new method with the existent one.*

*Keywords: cavitation, centrifugal pump, base characteristics, cavitation tests, accelerated method of cavitation tests.*

Кавитация – процесс нарушения целостности потока жидкости в зоне пониженного давления, заключающийся в образовании полостей, наполненных паром и выделившимися из жидкости газами. В насосах жидкостных ракетных двигателей кавитация возникает при падении входного давления  $p_{вх}$  ниже критического давления  $p_{срв}$  что приводит к срыву режима работы насоса, сопровождаемому уменьшением напора, КПД и расхода жидкости, а также приводит к кавитационной эрозии и возникновению автоколебаний давления. Срыв режима работы происходит из-за сильно развитой кавитационной зоны (рис. 1) и примыкающей к ней зоне отрыва, которая распространяется по каналу, приводя к уменьшению площади проходного сечения и, как следствие, к резкому падению напора насоса и расхода через него [1].

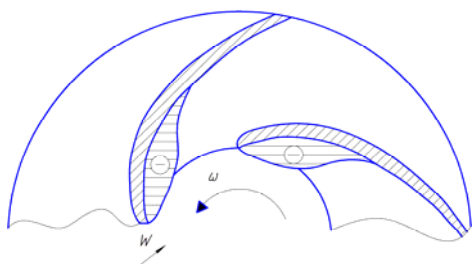


Рис. 1. Области развитой кавитации

Вследствие этого появляется необходимость проведения испытаний на определение антикавитацион-

ных свойств насоса. Эти свойства характеризуются величиной критического входного подпора  $\Delta h_{кр}$ , который на практике определяют для каждого насоса экспериментально, проводя кавитационные испытания [2]. Значение подпора находят по критическому входному давлению по формуле (1):

$$\Delta h_{срв} = \frac{p_{срв} - p_{н.п.}}{\rho}, \quad (1)$$

где  $p_{срв}$  – полное критическое входное давление, приводящее к срыву насоса, Па;  $p_{н.п.}$  – давление насыщенных паров жидкости, Па;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно принятой методике [2], кавитационные испытания проводятся следующим образом: после вывода насоса на рабочий режим, давление на входе в насос ступенчато снижается. При каждом снижении производится замер давления на входе и выходе насоса  $p_1, p_2$ , Па; угловой скорости вращения ротора  $\omega$ , рад/с; расхода жидкости через насос  $\dot{m}$ , кг/с. По этим данным определяют значение напора с помощью формулы (2) [2], а затем на миллиметровой бумаге строят кавитационную характеристику – зависимость  $H_i = f(P_1)$  при  $\dot{m}, \omega = \text{const}$ .

$$H_i = \frac{P_{2i} - P_{1i}}{\rho}. \quad (2)$$

Следующий этап – определение критического входного давления  $p_{срв}$ , соответствующего началу срыва режима работы. Эта величина определяется двумя методами:



– по координате точки пересечения аппроксимирующих прямых бесрывной и срывной части кавитационной характеристики;

– по координате точки уменьшения напора на величину, задаваемую в ТУ.

Имея значение  $p_{срв}$ , по формуле (1) рассчитывается  $\Delta h_{кр}$ .

На рис. 2 представлены кавитационные характеристики насоса, получаемые: 1) без соблюдения условия  $\dot{m} = \text{const}$  в области срыва – кривая 1; 2) с соблюдением условия  $\dot{m} = \text{const}$  – кривая 2.

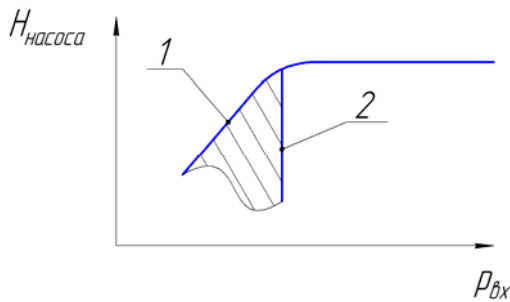


Рис. 2. Кавитационные характеристики насоса

На графике заштрихована область получения возможных характеристик. Экспериментальные данные показали, что расхождение результатов испытаний доходит до 6,3 %, а по данным источника [3] погрешность определения  $\Delta h_{кр}$  доходит до 10 %. Величины погрешностей рассчитывались по методике [4].

На основании вышеизложенного можно выделить основные недостатки существующей методики:

– значительная трудоемкость снятия кавитационной характеристики, как следствие, длительная работа насоса в условиях кавитации и снижение его надежности в целом;

– недостаточная точность определения критического входного давления;

– влияние субъективных факторов на результаты испытаний.

Согласно новой методике предлагается определять характеристики насосов при непрерывном, быстром изменении  $p_{вх}$  без поддержания расхода.

При ускоренных испытаниях необходима автоматизированная фиксация параметров, работающая по следующей схеме: после установления номинальных значений, расхода и угловой скорости начинается непрерывное снижение  $p_{вх}$ . При этом идет автоматическое сравнение фактического напора с номинальным. В момент, когда  $H_{факт} = (0,75 \dots 0,97) H_{ном}$ , происходит автоматический останов электродвигателя и фиксация значения  $p_{срв}$ .

Определение кавитационных параметров согласно новой методике приводит к тому, что процессы становятся нестационарными. Из анализа нестационарного режима, проведенного в работе [5], можно выделить следующие особенности проведения испытаний: прохождение области устойчивости выходных пара-

метров насоса  $p_2$ ,  $\dot{m}$ ,  $\omega$  ведется при быстром снижении давления на входе, а при подходе к области срыва скорость снижения  $p_{вх}$  уменьшается до величины, обеспечивающей низкую динамическую погрешность определения  $p_{срв}$ .

Ускоренные кавитационные испытания позволяют:

– уменьшить вероятность эрозионного разрушения, сократив время испытаний;

– снизить трудоемкость обработки результатов испытаний;

– устранить влияние субъективного фактора на результаты испытаний;

– повысить точность определения кавитационных параметров насосов.

### Библиографические ссылки

1. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1986, 376 с.

2. ГОСТ 6134–2007 Насосы динамические. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2007. 23 с.

3. Александров С. А., Павлович Л. А. Точность определения критического кавитационного запаса центробежных насосов при технологических испытаниях // Вестник машиностроения. 1977. № 6. С. 12–14.

4. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.

5. Совершенствование методики определения кавитационной характеристики шнекоцентробежных насосов / В. П. Назаров, Л. П. Назарова, Д. С. Швецова, Д. А. Савчин // Сибирский журнал науки и технологий. Красноярск, 2018. № 19(4). С. 664–650.

### References

1. Ovsyannikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZhRD*. [The theory and calculation of unit of liquid rocket engines] Izdanie 3, Moscow, Mashinostroenie, 1986. 376 p.

2. *GOST 6134–2007. Nasosy dinamicheskie. Metody ispytaniy* [State Standard 6134–2007. The dynamic pumps. Methods of tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 23 p.

3. Aleksandrov S. A., Pavlovich L. A. *Toch'nost' opredeleniya kriticheskogo kavitatsionnogo zapasa tsentrobezhnykh nasosov pri technologicheskikh ispytaniyakh* [Correctness of determination of the critical cavitation reserve of the pumps at technological tests] // Vestnik mashinostroeniya. 1977. № 6. P. 12–14 (In Russ.).

4. Rabinovich S. G. *Pogreshnosti izmereniy* [The faults of the measurements]. Leningrad, Energiya, 1978. 262 p.

5. Nazarov V. P., Nazarova L. P., Shvetsova D. S., Savchin D. A. Improvement of the method of determining cavitation characteristics of the centrifugal pumps // Siberian journal of science and technology. Krasnoyarsk, 2018. № 19(4) P. 664–650 (In Russ.).

© Назаров В. П., Савчин Д. А., Назарова Л. П., 2019

УДК 621.454.2

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОПРОСЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНЫХ ЖРД

В. П. Назаров, Г. С. Яцуненко

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

*Представлены перспективные вопросы стендовых испытаний кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей разгонных блоков.*

*Ключевые слова: ЖРД, кислород, водород, разгонный блок, испытания.*

## PERSPECTIVE ISSUES OF LOX/LH LRE BENCH TESTING

V. P. Nazarov, G. S. Yatsunenکو

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gsyatsunenکو@gmail.com

*The report presents perspective issues of oxygen-hydrogen liquid rocket engines bench testing for space tugs.*

*Keywords: LRE, oxygen, hydrogen, space tug, tests.*

Разработка жидкостных ракетных двигателей для разгонных блоков требует проведения большого объема опытно-конструкторских работ, а также испытаний как отдельных элементов, так и всего изделия целиком. Одним из завершающих этапов разработки изделия является проведение стендовых испытаний.

Стендовые испытания направлены на проверку работоспособности изделия при номинальном режиме работы в условиях, максимально приближенных к предполагаемым условиям работы двигателя, а также отработку конструктивных решений [1]. В случае разгонных блоков, условий работы которых предполагают низкие давление и температуру окружающей среды, воссоздание внешних факторов требует применения дополнительного оборудования [2].

Условие низкого давления окружающей среды моделируется путем использования барокамеры, давление в которой обычно равно 2–3 кПа на протяжении всего времени проведения испытаний.

В процессе работы двигателя в сопле возникает система косых скачков уплотнения, замыкающаяся слабым прямым скачком, что приводит к торможению сверхзвукового потока газа. При практических расчетах, система скачков уплотнения заменяется одним сильным скачком уплотнения, что позволяет сильно упростить вычисления при отсутствии значимой погрешности.

Величина понижения полного давления продуктов сгорания зависит от степени расширения сопла двигателя и может достигать 97 %. При этом возрастают статическое давление и температура газа, которая приближается к температуре в камере сгорания. Режим работы изделия считается штатным при условии обеспечения безотрывного истечения продуктов сго-

рания через сопло. В основном это определяется такими параметрами, как давление в камере сгорания, площадь критического сечения и площадь среза сопла. Штатный режим работы сопла сохраняется в небольшом промежутке величины давления продуктов сгорания на срезе сопла, который колеблется около давления окружающей среды. Слишком высокое давление газа на срезе сопла приводит к работе двигателя на режиме недорасширения; обратная ситуация приводит к режиму перерасширения. Любой режим работы сопла, кроме расчетного (штатного), приводит к нерациональному расходованию ресурсов двигателя, однако режим перерасширения особенно опасен тем, что скачки уплотнения на срезе сопла заходят на внутреннюю поверхность, что приводит к перегреву и появлению прогаров сверхзвуковой части сопла, поэтому для предотвращения разрушения изделия необходимо применять теплозащиту.

Одним из перспективных способов проведения стендовых испытаний является применение газодинамической трубы (ГДТ). Данная конструкция относительно малогабаритна, обеспечивает упрощение светомаскировки проводимых испытаний, позволяет эффективно тормозить газовые потоки, а также, при необходимости, осуществляет нейтрализацию продуктов сгорания.

В общем случае газодинамическая труба представляет собой диффузор, в котором сверхзвуковая струя газа тормозится до дозвуковой скорости, что приводит к повышению статического давления и температуры продуктов сгорания [3]. Эффективность ГДТ определяется степенью сжатия газа и может быть найдена как отношение давления газа на выходе из газодинамической трубы к давлению газа на входе

в нее. Прохождение газа через ГДТ сопровождается скачками уплотнения, из-за чего происходят потери энергии, и в статическое давление преобразуются лишь 3–5 % полного давления. При этом степень сжатия обычно составляет 50–70 %. Далее по направлению течения продуктов сгорания в ГДТ могут быть установлены системы подачи воды для охлаждения газов и системы подачи определенных реагентов для их нейтрализации. Протяженность и состав газодинамической трубы зависят от типа и параметров испытываемого изделия.

Так как испытания двигателей разгонных блоков необходимо проводить в барокамере, пространство низкого давления необходимо объединить с ГДТ, которая будет служить для этой камеры выхлопной трубой. Для многокамерных двигателей или двигателей с рулевыми соплами газодинамическая труба имеет отдельный рукав для каждого сопла. При этом давление в барокамере поддерживается равным 2–3 кПа для обеспечения не только давления, но и конвективных процессов, близких к условиям эксплуатации изделия.

Этапы отработки испытаний двигателя на стенде включают в себя захолаживание полостей компонентов топлива с последующей заливкой данных полостей компонентами, запуск двигателя при различных тепловых условиях среды, выведение двигателя на номинальный режим и проверка работоспособности системы поддержания тяги и соотношения расходов компонентов топлива.

ГДТ может располагаться как горизонтально, так и вертикально, в зависимости от необходимости, что делает ее достаточно универсальным дополнением к уже существующим испытательным стендам. Существуют примеры использования ГДТ, расположенной вертикально и частично углубленной в землю, при этом испытываемое изделие подвешено над уровнем земли, а улавливание, охлаждение и нейтрализация продуктов сгорания происходит в подземных коллекторах.

В целом газодинамическая труба позволяет упростить решение многих задач, которые появляются при проведении стендовых испытаний, сокращая воздействие на окружающую среду компонентов топлива, уменьшая требуемые для проведения испытаний площади, а также упрощая маскировку проведения испытаний. Однако подобное сооружение приводит к удорожанию и усложнению испытательного оборудования, которое и без того является сложным и дорогостоящим.

#### Библиографические ссылки

1. Оптимизация конструктивных схем кислородно-водородных ЖРД разгонных блоков / В. Ю. Пиунов, В. П. Назаров, А. А. Зуев и др. // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практич.

конф. В 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 212–213.

2. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с.

3. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники / А. Г. Галеев, Ю. В. Захаров, В. П. Макаров, В. В. Родченко. М. : Изд-во МАИ, 2014. 328 с.

4. Зуев А. А., Назаров В. П., Фальков В. О. Экспериментальные исследования и стендовые испытания криогенных жидкостных ракетных двигателей перспективных разгонных блоков // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практич. конф. В 2 ч. Ч. 1 / СибГУ им. М. Ф. Решетнев. Красноярск, 2018. С. 201–202.

5. Назаров В. П., Зуев А. А., Фальков В. О. Особенности стендовых испытаний криогенных жидкостных ракетных двигателей разгонных блоков // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практич. конф. В 2 ч. Ч. 1 / СибГУ им. М. Ф. Решетнев. Красноярск, 2018. С. 207–209.

#### References

1. Piunov V. Yu., Nazarov V. P., Zuev A. A. Optimization of constructive schemes of oxygen-hydrogen LREs of upper stages // Reshetnevsky readings : materials of the 20th Jubilee International. scientific-practical. conf. In 2 parts. Part 1 / Sib. state aerospace un-ty. Krasnoyarsk, 2016. P. 212–213.

2. Yatsunenkov V. G., Nazarov V. P., Kolomentsev A. I. Stand testing of liquid rocket engines / Sib. state aerospace un-ty ; Moscow. aviat. in-t. Krasnoyarsk, 2016. 248 p.

3. Design of test benches for experimental testing of rocket and space technology facilities / A. G. Galeev, Yu. V. Zakharov, V. P. Makarov, V. V. Rodchenko. M. : Izd-vo MAI. 2014. 328 p.

4. Zuev A. A., Nazarov V. P., Falkov V. O. Experimental investigations and bench tests of cryogenic liquid rocket engines are promising upper stages // Reshetnevsky readings : materials of the 22th International. scientific-practical. conf. In 2 parts, Part 1 / Siberian State University named after M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2018. P. 201–202.

5. Nazarov V. P., Zuev A. A., Falkov V. O. Features of bench tests of cryogenic liquid rocket engines boosters // Reshetnevsky readings : materials of the 22th International. scientific-practical. conf. In 2 parts, Part 1 / Siberian State University named after M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2018. P. 207–209.

© Назаров В. П., Яцуненко Г. С., 2019

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПОЛОСТЯХ НАСОСОВ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

И. С. Неватус, В. К. Бузунов, П. С. Муравьев

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

*Рассмотрена тема увеличения максимальных значений КПД насосов ТНА ЖРД. Наиболее важной научно-практической задачей в данной ситуации становится изучение особенностей течения рабочего тела с теплообменом в каналах гидравлического тракта центробежных насосов. Особое внимание уделяется исследованию гидродинамических и тепловых процессов в полостях вращения турбоагрегатов, поскольку существующие методики расчета вращательных течений с теплоотдачей носят эмпирический характер и не всегда обеспечивают нужную точность определения гидродинамических и тепловых характеристик. Сформирован методологический подход к исследованию локальной теплоотдачи динамического потока и закономерностей потери энергии при течении жидкости в каналах насосных агрегатов в докладе представлено математическое выражение для интегрального соотношения уравнения энергии пространственного пограничного слоя.*

*Ключевые слова: пограничный слой, полости вращения турбоагрегатов, методика расчета вращательных течений.*

## HYDRODYNAMIC AND THERMAL FLOW PARAMETERS IN THE CAVITIES OF THE ROCKET ENGINE PUMPS

I. S. Nevatus, V. K. Buzunov, P. S. Muravyov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: nevatusis@gmail.com

*This article discusses the problem of increasing the maximum values of efficiency TNA LRE pumps. The most important scientific and practical task in this situation is the study of the characteristics of the flow of the working fluid with heat transfer in the channels of the hydraulic tract of centrifugal pumps. Particular attention is paid to the study of hydrodynamic and thermal processes in the cavities of rotation of turbine units, since existing methods for calculating rotational flows with heat transfer are empirical in nature and do not always provide the necessary accuracy in determining the hydrodynamic and thermal characteristics. A methodological approach to the study of the local heat transfer of the dynamic flow and the patterns of energy loss during fluid flow in the channels of pumping units is formed in the paper. The mathematical expression for the integral relation of the energy equation of the spatial boundary layer is presented.*

*Keywords: boundary layer, cavities of rotation of turbine units, calculation method of rotational flows.*

Стабильность энергетических параметров центробежных насосов турбонасосных агрегатов (ТНА) ракетных двигателей в условиях опытно-конструкторского и серийного производства обеспечивается комплексной системой оптимального проектирования гидравлического тракта, исследования и анализа конструктивно-технологических факторов, влияющих на отклонения параметров от номинальных значений, и адаптивного управления величинами отклонений на всех этапах жизненного цикла изделий. Оценка динамики стабильности энергетических параметров и гидродинамических характеристик насосов осуществляется по результатам модельных испытаний (в том числе огневых испытаний в составе двигателя) [1]. При этом ряд параметров непосредственно измеряют при испытаниях, другие определяют расчетными методами с использованием результатов косвенных измерений.

В общем виде методика исследования стабильности энергетических параметров (напора, КПД и мощности) центробежных насосов включает:

- анализ элементов гидравлического тракта с выделением характерных функциональных участков (подводящие и отводящие устройства, полости вращения между дисками рабочего колеса и стенками корпуса и т. п.);
- определение аналитических зависимостей между гидродинамическими, геометрическими, тепловыми параметрами на функциональных участках;
- определение зависимостей между показателями точности испытаний насосов и отклонениями энергетических параметров за счет погрешностей системы измерений;
- оценку корреляции отклонений контролируемых параметров и технологических факторов, влияющих на эти отклонения при изготовлении насосов;

– сравнительный анализ расчетных значений энергетических параметров с результатами испытаний на модельных режимах.

В связи с повышением энергонапряженности рабочих процессов в ТНА, стремлением к получению максимальных значений КПД насосов важной научно-практической задачей становится изучение особенностей течения рабочего тела с теплообменом в каналах гидравлического тракта центробежных насосов [2]. Особое внимание уделяется исследованию гидродинамических и тепловых процессов в полостях вращения турбоагрегатов, поскольку существующие методики расчета вращательных течений с теплоотдачей носят эмпирический характер и не всегда обеспечивают нужную точность определения гидродинамических и тепловых характеристик.

При постановке данной задачи необходимо учитывать изменение температуры потока по длине рабочего канала, поскольку вязкость как функция температуры, в основном, определяет режим течения. Поэтому, рассматривая течение несжимаемой жидкости, необходимо провести совместное решение уравнений изменений количества движения и сохранения энергии в граничных условиях пространственного пограничного слоя. Для сжимаемой жидкости известную систему уравнений следует дополнить уравнением фазового состояния вещества (рабочего тела).

С целью формирования методологического подхода к исследованию локальной теплоотдачи динамического потока и закономерностей потери энергии при течении жидкости в каналах насосных агрегатов в докладе представлено математическое выражение для интегрального соотношения уравнения энергии пространственного пограничного слоя [3].

В ходе теоретического анализа и решения задачи теплообмена потока жидкости и твердой поверхности закон теплообмена выражен через критерий Стантона [4].

Выполнены преобразования уравнения энергии для пространственного пограничного слоя, получены математические выражения характерных толщин пограничного слоя для турбулентных профилей и толщин потери энергии для прямолинейного и вращательного режимов течения.

Теоретические исследования сопровождались проведением модельных испытаний на экспериментальной установке. Проводилось определение параметров течения жидкости (воды) с теплоотдачей на характерных режимах, адекватно отражающих реальные режимы течения компонентов топлива.

Исследовались параметры равномерного прямолинейного течения в трубе, вращательного течения по закону «твердого тела», вращательного течения в торцевой щели по закону «свободного вихря».

По результатам аналитического расчета и эксперимента получены зависимости коэффициентов теплоотдачи от объемного расхода и температуры исследуемого рабочего тела. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5 %.

В итоге теоретических и экспериментальных исследований разработана методика, алгоритмы и программы расчета течения рабочего тела с теплоотдачей в полостях вращения насосных агрегатов. Использование данной методики в приложении с программами расчета позволит оптимизировать некоторые проектные решения при создании турбонасосных агрегатов РД с высокими энергетическими характеристиками и стабильными гидродинамическими параметрами в условиях производства и эксплуатации изделий.

#### Библиографические ссылки

1. Повышение качества и стабильности параметров турбонасосных агрегатов ЖРД. «Технология машиностроения» / М. В. Краев, В. П. Назаров, Н. А. Терехин, Е. М. Краева. М. : Машиностроение, 2002. № 4. С. 36–40.
2. Зуев А. А., Назаров В. П., Арнгольд А. А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.
3. Зуев А. А., Павлыш А. А. Исследование течения с теплоотдачей в стенку в граничных условиях агрегатов подачи энергетических установок летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. С. 137–138.
4. Кишкин А. А., Зуев А. А., Леонов В. П. Локальная теплоотдача в граничных условиях турбомашин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1(658). С. 3–10.

#### References

1. Improving the quality and stability of the parameters of the turbopump units of liquid rocket engines / M. V. Kraev, V. P. Nazarov, N. A. Terehin, V. M. Kraev. Moscow, Mashinostroeniye, 2002. № 4. P. 36–40.
2. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A. [The local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the cavities of rotation of the gas turbines] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2019. Vol. 26. № 2. P. 99–115.
3. Zuev A. A., Pavlysh A. A. [Issledovaniye techeniya s teplootdachey v stenu v granichnykh usloviyakh agregatov podachi energeticheskikh ustanovok letatelnykh apparatov] // Reshetnevskiye chteniya. 2014. Vol. 1. P. 137–138.
4. Kishkin A. A., Zuev A. A., Leonov V. P. [Local heat transfer in the boundary conditions of turbomachines]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Moscow, Mashinostroyeniye, 2015. № (658). P. 3–10.

© Неватус И. С., Бузунов В. К., Муравьев П. С., 2019

УДК 629.7.036, 004.942

## РАЗРАБОТКА ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. А. Печенин\*, И. А. Грачев, Н. В. Рузанов, М. А. Болотов

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

\*E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru

*Представлена методика создания моделей деталей на основании координат измеренных точек их поверхностей, необходимые для проведения прогнозных расчетов собираемости изделий и выполнения САЕ-расчетов в аэрокосмической технике.*

*Ключевые слова: действительная модель, деталь, плоская и цилиндрическая поверхности, погрешность.*

## DEVELOPMENT OF VALID OBJECT MODELS FOR THE CONDITIONS OF DIGITAL PRODUCTION

V. A. Pechenin\*, I. A. Grachev, N. V. Ruzanov, M. A. Bolotov

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru

*The paper presents a methodology for creating models of parts based on the coordinates of the surfaces measured points, which is necessary for making predictive calculations of product collection and performing CAE calculations in aerospace engineering.*

*Keywords: actual model, detail, flat and cylindrical surfaces, error.*

Сложные промышленные и наукоёмкие изделия характеризуются высокими требованиями к геометрической точности деталей и сборочных единиц. К таким изделиям относятся современные авиационные и ракетные двигатели, к которым предъявляются высокие требования по надежности, массе, экономичности и ресурсу. В производстве авиационных двигателей выполняются пробные сборки изделия, которые необходимы для определения оптимального способа сборки, обеспечивающего заданное качество. Выполнение пробныхборок деталей сопряжено с заметными затратами трудовых и временных ресурсов предприятий. Пробные сборки деталей могут быть исключены за счёт использования цифрового прогнозирования геометрических сборочных параметров по результатам контактного, лазерного и оптического сканирования отдельных деталей. Кроме того, для адекватности многих САЕ-расчетов в области газодинамики [1] и вибраций, так же требуется информация о встречающихся в производстве отклонениях деталей. Поскольку геометрия изделия оказывает значительное влияние на показатели качества, а также необходима для многочисленных численных расчетов, в работе рассматривается методика создания геометрических действительных моделей деталей.

Действительные модели могут описывать геометрические, механические, физические, химические и другие параметры описываемого объекта. Действительная модель объекта, отражающая его геометриче-

ские параметры, может быть сформирована на основе измерений и обработки их результатов. В качестве рассматриваемых объектов могут выступать: заготовки, детали, сборочные единицы, изделия, технологические объекты и др.

На рис. 1 приведен рассматриваемый в работе объект – деталь-имитатор диска. Имитатор собирается с ответной деталью по плоско-цилиндрическим поверхностям, базовой поверхностью является внутреннее отверстие. Было проведено измерение поверхностей на координатно-измерительной машине, массивы измеренных точек поверхностей имитатора так же приведены на рис. 1. Координаты точек измерительной программы сохраняются в файле \*.txt, после чего импортируются в систему MATLAB, где производится обработка измеренных данных.

После загрузки координат точек по поверхностям производится их обработка и приведение к структуре для дальнейшего построения поверхностей. Обработка координат точек заключается в сглаживании выпадающих значений и вычислении координат точек, не хватающих для построения структуры данных. Сглаживание осуществлялось методом скользящей средней [2].

Вычисление координат точек заключается в формировании сечений поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей посредством сплайнов в виде профилей или поверхностей [3].

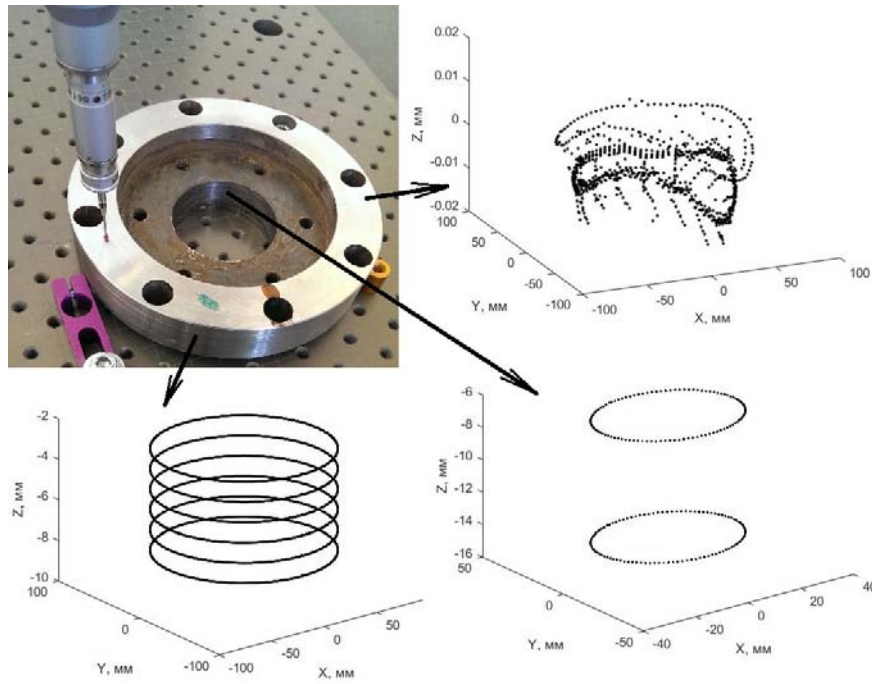


Рис. 1. Деталь-имитатор диска и измеренные точки его поверхностей

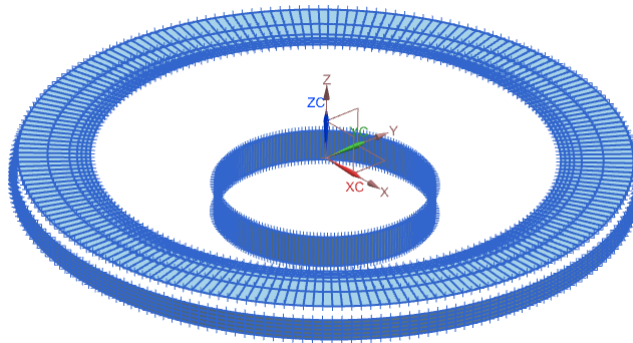


Рис. 2. Построенные действительные поверхности имитатора в системе NX

В общем виде сложные поверхности деталей представляются в порционном виде, т. е. похожем на лоскутное одеяло. Кривые и поверхности сложной формы в CAD-системах и метрологическом обеспечении измерительного оборудования описываются сплайновыми уравнениями. Для математического представления пространственных кривых в программе NX использован нормализованный кубический сплайн 3-й степени – Эрмитова кривая [4]. Для описания поверхностей деталей, имеющих геометрические отклонения формы, использовались поверхности, образованные из бикубических порций (порции Кунса [5]). Этап загрузки координат обработанных точек поверхностей и построения самих поверхностей был автоматизирован при помощи программного приложения в модуле NX/Open API на языке программирования Visual Basic. На рис. 2 приведены построенные в программе NX действительные поверхности имитатора.

Используя построенные поверхности производится перестроение номинальной CAD-модели. Получившаяся модель является действительной моделью детали, учитывающий реальные отклонения геометрии.

Разработанные модели можно импортировать в различные CAE-пакеты для проведения расчетов. Актуальным является направление прогнозирования сборочных параметров изделий по результатам измерений отдельных деталей. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках стипендии Президента Российской Федерации (номер СП-262.2019.5).

#### Библиографические ссылки

1. The best model for the calculation of profile losses in the axial turbine / O. V. Baturin, G. M. Popov,

D. A. Kolmakova et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803 (1). P. 012017.

2. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М. : Радио и связь, 1997. 112 с.

3. Печенин В. А., Рузанов Н. В., Болотов М. А. Модель и программный модуль для прогнозирования погрешностей координатных измерений в NX OPEN API // Информационные технологии и нанотехнологии : сб. тр. IV Междунар. конф. и молодёжной школы (ИТНТ-2018). 2018. С. 1454–1460.

4. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб. : Питер, 2004. 560 с.

5. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М. : Мир, 2001. 604 с.

### References

1. The best model for the calculation of profile losses in the axial turbine / O. V. Baturin, G. M. Popov, D. A. Kolmakova et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803 (1). P. 012017.

2. Greshilov A. A., Stakun V. A., Stakun A. A. *Matematicheskie metody postroeniya prognozov* [Mathematical methods for forecasting]. Moscow, Radio i svyaz', 1997, 112 p.

3. Pechenin V. A., Ruzanov N. V., Bolotov M. A. [Model and software module for predicting coordinate measurement errors in the NX OPEN API] // *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii : Sbornik trudov IV Mezhdunar. konf. i molodyozhnoj shkoly (ITNT-2018)*. [Proceedings of the IV International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies" (ITNT-2018)]. Samara, 2018. P. 1454–1460 (In Russ.).

4. Li K. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)* [CAD Basics (CAD / CAM / CAE)]. St. Petersburg : Piter, 2004, 560 p.

5. Rogers D., Adams J. *Matematicheskie osnovy mashinnoj grafiki* [Mathematical Elements for Computer Graphics]. Moscow, Mir, 2001. 604 p.

© Печенин В. А., Грачев И. А.,  
Рузанов Н. В., Болотов М. А., 2019



## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА 3D-МОДЕЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ

С. В. Титенков<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: vz@sibsau.ru

*Перечислены актуальные проблемы производства 3D-трубопроводов, применяемых в аэрокосмической отрасли, раскрыт обобщённый алгоритм гибки на агрегате – трубогибе и графический показан наиболее часто применяемый пример гибок.*

*Ключевые слова: 3D-модель трубопровода, агрегат гибки, ролик гибок трубопровода.*

## AKTUAL PROBLEMS OF THE PRODUCTION OF 3D-MODELS OF PIPELINES

S. V. Titenkov<sup>1</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: vz@sibsau.ru

*At the beginning of the work, the actual problems of the production of 3D-pipelines used in the aerospace industry are listed, then a generalized bending algorithm for the unit – a pipe bender is disclosed and the most commonly used example of bending is graphically shown.*

*Keywords: 3D-pipeline model, bending unit, pipeline bending roller.*

На сегодняшний день среди предлагаемого технологического оборудования для гибки труб, для разных отраслей промышленности, в том числе для аэрокосмической, имеется достаточно сильная конкуренция за покупателя новых агрегатов. Используются достаточно сильные рекламные приёмы с распространением буклетов, видео и с завышенными возможностями станков – трубогибов. Фактически, после приобретения того или иного трубогибочного оборудования организация – эксплуататор сталкивается с существенными недостатками при использовании и обслуживании данного вида оборудования, которые на сегодняшний день не решены, а это:

– достаточно быстрая изнашиваемость сменных частей станков (оснастки участвующей в непосредственном механическом воздействии), что не позволяет применять оборудование в интенсивном и бесперебойном массовом производстве;

– завышенная и необоснованная стоимость упомянутых оригинальных быстроизнашиваемых сменных частей предлагаемых фирмой – производителем, что в свою очередь ставит в уязвимое и зависимое финансовое положение эксплуатирующей организации, ограничивает экономическую, временную, технологическую эффективность производства и повышает себестоимость производства [1];

– отсутствует универсальность гибочной оснастки, что приводит к невозможности использования одного комплекта гибочных головок для нескольких типоразмеров, что, в свою очередь, ведёт к необходимости постоянной смены оснастки при каждом начале производства изделия иного размера (например: диаметра, толщины, конфигурации и т. п.);

– отсутствует универсальный техпроцесс производства и гибок трубопроводов при таких агрегатах гибки, в итоге в производстве используется громоздкий объём техпроцессов при изготовлении трубопроводов разных диаметров и разной конфигурации, что осложняет оперативность общего производственного процесса и технологического контроля как имеющейся номенклатуры трубопроводов, так и вновь вводимых трубопроводов;

– достаточно высокая трудоёмкость и длительное время процесса смены комплекта гибочной оснастки увеличивают временные затраты производственного процесса;

– процесс изготовления трубопроводов сопровождается элементами ручного труда, например, догибки, так как в большинстве случаев производителем станка не учитывается коэффициент пружинения материала трубопровода. Вычислить данный коэффициент невозможно, так как у каждой партии трубопроводов

он свой, поэтому решение данной проблемы лежит в технологическом процессе учёта данного фактора [2];

- за редким исключением, почти ни в одном оборудовании не используются подготовительные производственные термодинамические способы нагрева (для стали) или охлаждения (для алюминия) обрабатываемого трубопровода, что могло бы значительно облегчить механическое воздействие оснастки на трубопровод и упростить процесс производства;

- для каждого типоразмера (диаметра) трубопровода и каждой его конфигурации необходимо создание программы для работы станка – трубогиба узкими специалистами, что увеличивает время и трудоёмкость изготовления изделия. Например, работник – станочник, без навыков создания 3D-модели и без познаний программирования, не может оперативно изготовить новый трубопровод с новой конфигурацией без задействования нескольких вспомогательных узкоспециализированных служб предприятия. Создание современной программы на станке, учитывающей данный запрос, могло бы исключить потерю времени по этому фактору;

- запрет от производителя станка производить ремонт, усовершенствование как механической, так и программной составляющей оборудования ведёт к запрету совершенствования имеющейся технологии, исключает возможность повышения производительности и увеличения технологических возможностей оборудования [3].

В итоге предприятие эксплуатирующее новое оборудование рискует столкнуться с техническими сложностями использования оборудования, его низкой производительностью и столкнуться с постоянной зависимостью от изготовителя оборудования.

Наиболее часто применяющийся алгоритм гибки на агрегате – трубогибе следующий [4]:

1. На станок устанавливается конкретный один комплект оснастки из типоразмеров гибочных головок (под диаметр трубы и под уголгиба). Обычно это ролик, который гнёт трубу, ролик внешний – выполняющий гиб трубы, узел из двух прижимов для захва-

та и перемещения трубы вдоль станка, ролик поддержки трубы со стороны основания станка, два ролика для холостого проталкивания трубы. В зависимости от модели станка количество роликов может быть больше.

2. Затем на дорн агрегата «Захват – перемещение» устанавливается труба.

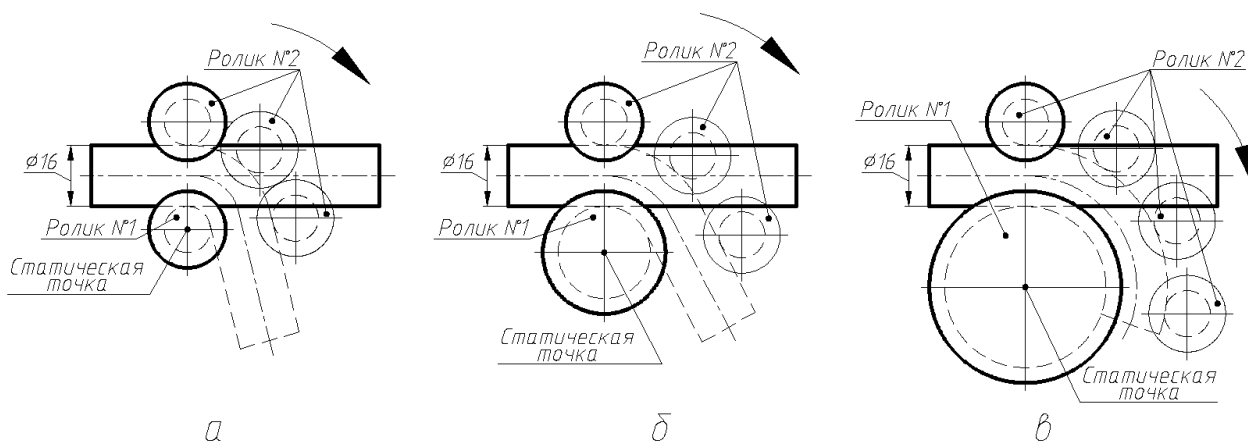
3. Включается подача технологических расходных ресурсов станка: электроэнергия, воздух, вода, подача масла.

4. Через меню ввода на стойке пульта управления станка программист загружает конкретную программугиба трубы.

5. Выполняются возможные станком технологические операциигиба, с многочисленной заменой гибочной оснастки с нужным радиусомгиба и с последующей ручной подгибкой из-за отсутствия возможности контроля пружинения.

На рисунке рассмотрим три примерагиба трубопровода диаметром  $\varnothing 16$  по наиболее часто применяемому принципугиба в агрегатахгибки. На рисунках *a*, *b*, *в* ролики № 2 одинакового размера, с помощью которого осуществляется непосредственный гиб трубопровода. При этом на упомянутых рисунках ролики № 1 выполняют функцию радиусагиба трубопровода и соответственно имеют разные размеры. При необходимости выполнениягиба трубы иного радиуса [5], каждый раз ролик № 1 на станке – трубогибе заменяется. Сам процессгиба выполнения чертёжной конфигурации содержащей множество радиусов подразумевает неоднократную замену ролика № 1, что значительно увеличивает трудоёмкость производства.

Из представленных рисунков *a*, *b* и *в* и вышеупомянутого анализа эксплуатации агрегатовгибки можно сделать вывод о не технологичности общепринятого принципагиба трубопроводов применяемого в большинстве станков, бессмысленности и неэффективности затрат на совершенствование упомянутых агрегатов и необходимости внедрения в производство станков – трубогибов, исключая или значительно снижающих вышеуказанные проблемы.



Принципгибки трубопроводов большинства агрегатов –гибки, при которых размер ролика № 1 в зависимости от требуемого радиусагиба увеличивается (*a*, *b*, *в*)

**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 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 2. С. 195–196.

3. Титенков С. В., Журавлев В. Ю. Перспективы развития системы технологии гибки трубопроводов 3D-конфигурации на производстве // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 703–715.

4. Как производится гибка металлических труб, технологические тонкости выполнения работ // Совет инженера [Электронный ресурс]. URL: <http://sovet-ingenera.com/santeh/trubodel/gibka-trub.html> (дата обращения: 30.08.2019).

5. ОСТ 92-1600–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов. М. : Стандартиформ, 1984. 47 с.

**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. 195–196.

3. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Perspektivy razvitiya sistemy tekhnologii gibki truboprovodov 3D-konfiguratsii na proizvodstve [Prospects for the development of a system of technology for bending pipelines 3D-configurations in production] // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. Part 19, № 4. P. 703–715.

4. How is metal pipe bending performed: technological details of the work [Electronic resource]. URL: <http://sovet-ingenera.com/santehtrubodel/gibka-trub.html> (access: 30.08.2019).

5. OST 92-1600–84 Proizvodstvo truboprovodov. Obshie tehticheskie uslovia. Etalonirovanie truboprovodnih system, gibka trub I formoobrazovanie koncov truboprovodov. [State Standard 92-1600-1984. Production of pipelines. Standardization of pipeline systems, pipe bending and shaping of pipeline ends]. Moscow, Standartinform Publ., 1984. 47 p.

© Титенков С. В., Журавлев В. Ю., 2019

УДК 629

## ОПТИМАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ АГРЕГАТА ГИБКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБОПРОВОДОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

С. В. Титенков<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: vz@sibsau.ru

*Поставлена задача исследования, показаны стандартные параметры технологических ресурсов на предприятиях аэрокосмического машиностроения, затем описываются элементы агрегата гибки и пневмогидравлическая схема.*

*Ключевые слова: агрегат гибки, пневмогидравлическая схема, гибка трубопроводов.*

## OPTIMUM DESIGN AND FUNCTIONING OF THE BENDING UNIT IN THE PRODUCTION OF PIPELINES OF COMPLEX CONFIGURATION

S. V. Titenkov<sup>1</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>JSC «Krasnoyarsk Machine Building Plant»

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: vz@sibsau.ru

*At the beginning, the research task was set, then the standard parameters of technological resources at aerospace engineering enterprises are shown, then the elements of the bending unit and pneumohydraulic are described.*

*Keywords: bending unit, pneumohydraulic circuit, pipe bending.*

Задачей данной работы является определение для агрегата гибки трубопроводов: оптимальной, финансово не обременительной конструкции для эксплуатации; ремонтпригодных внутренних механизмов; высокопроизводительного и минимизирующего возможность брака узла роликовых частей непосредственного механического воздействия при гибке трубопроводов. При определении механической конструкции агрегата гибки важным является этап определения оптимальной рабочей пневмогидравлической схемы станка – трубогиба (показывающей подачу технологических расходных ресурсов станка – воздух, вода, масло), что может позволить выполнить большую часть вышеуказанных задач.

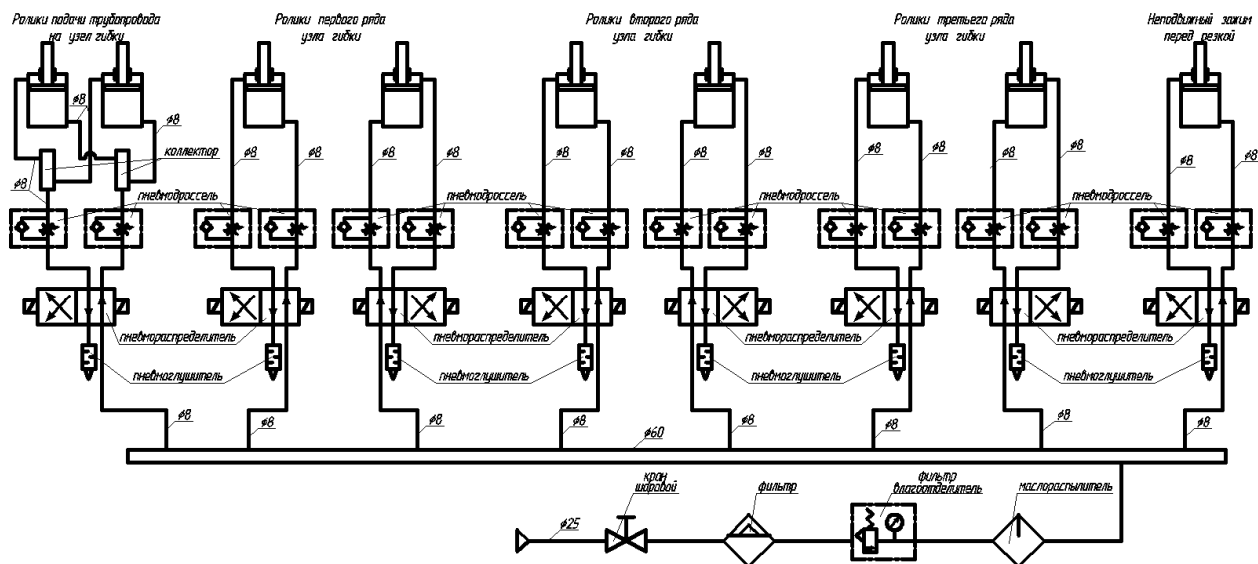
Стандартные параметры подводимых технологических ресурсов на промышленных предприятиях страны следующие: давление сжатого воздуха – 5 кг/см<sup>2</sup>; напряжение питания – 380 В (50 Гц); напряжение вспомогательных цепей – 24 В; минимальная и максимальная температура в помещении нахождения оборудования от +5 °С до +40 °С. Гидравлические характеристики могут быть разными, поэтому определим наиболее часто применяемые параметры: объём гидростанции технического масла станка – 40 дм<sup>3</sup>; охлаждение гидростанции – воздушное; максимальная производительность гидростанции – 25 л/мин; максимальное давление гидростанции – 100 кг/см<sup>2</sup>.

Установка гибки трубопроводов состоит из статических и динамических элементов, большая часть

которых располагается на траверсе (внутри на переключателях) под столом гибочного устройства. Правильный гибочный узел установлен либо сбоку (на выходе) установки, либо на столе гибки (над механизмами станка). Отдельно от установки стоят: шкаф автоматики и аппаратуры, переносной кнопочный пульт управления, механизм подачи с мест (бухт) хранения и последующего выравнивания трубопроводов перед их гибкой.

Исходя из вышеизложенного, основными элементами агрегата гибки являются [1–3]:

- бухта хранения труб;
- механизм подачи труб на агрегат;
- узел правки и выравнивания труб;
- агрегат «Захват – перемещение с помощью сервопривода, (или пневмоцилиндра) и мотор – редуктора»;
- агрегат «Резка трубы» (используется при потребности);
- устройство дорна (уменьшающего вероятность разрыва трубы при гибке, устанавливается внутри трубопровода и используются подшипниковые составляющие дорна при непосредственном гйбе);
- второй агрегат «Захват – перемещение (сервопривод и мотор – редуктор)»;
- агрегат «Вращение по оси трубы с помощью редуктора»;
- механизм нагрева – охлаждения трубы
- узел «Гибка трубопровода» (с помощью роликов непосредственного механического воздействия на



Пневмогидравлическая схема агрегата гибки трубопровода

трубопровод) используются пневмодроссели, пневмораспределители, пневмоглушители и прочее;

- агрегат «Зажима трубы для резки» (с помощью нескольких сервоприводов);
- агрегат «Резка трубы» (с помощью гидроцилиндра);
- место заглушки концов трубопровода сложной конфигурации.

Окончательное утверждение пневмогидравлической схемы возможно после определения окончательного метода и принципа действия используемых гибочных роликов. Ориентировочная пневмогидравлическая схема агрегата гибки трубопровода [4; 5] показана на рисунке.

#### 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 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 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 2. С. 195–196.
3. Титенков С. В., Журавлев В. Ю. Перспективы развития системы технологии гибки трубопроводов 3D-конфигурации на производстве // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 703–715.
4. ОСТ 92-0266–73. Арматура и узлы пневмогидравлических систем. Общие ТУ. М. : Стандартинформ, 1973. 80 с.
5. ОСТ 92-1600–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование

концов трубопроводов. М. : Стандартинформ, 1984. 47 с.

#### 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 acad. M. F. Reshetnev : 2 parts / under the 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 editorship of Y. Y. Loginov ; Sib. state univ. Krasnoyarsk, 2018. Part 1. P. 195–196.
3. Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. Perspektivy razvitiya sistemy tekhnologii gibki truboprovodov 3D-konfiguratsii na proizvodstve [Prospects for the development of a system of technology for bending pipelines 3D-configurations in production] // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. Part 19, № 4. P. 703–715.
4. OST 92-0266–73. Armatura i uzly pnevmogidravlicheskih sistem. Obshchiye TU. [Valves and pneumohydraulic systems. Genersl TU]. Moscow, Standartinform Publ., 1973. 80 p.
5. OST 92-1600–84. Proizvodstvo truboprovodov. Obshie tehticheskie uslovia. Etalonirovanie truboprovodnih sistem, gibka trub I formoobrazovanie koncov truboprovodov. [State Standard 92-1600–1984. Production of pipelines. Standardization of pipeline systems, pipe bending and shaping of pipeline ends]. Moscow, Standartinform Publ., 1984. 47 p.

УДК 629.7.036.54.063.6:621.565.93/.94

## К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАВИТАЦИИ В ТУРБОНАСОСАХ ЖРД

А. С. Торгашин, Д. А. Жуйков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: ttarg23@yandex.ru

*Рассматривается возможность использования вычислительных программных пакетов для моделирования кавитации в потоке при проектировании насосов ТНА ЖРД.*

*Ключевые слова:* ЖРД, насос, кавитация.

## TO THE FORMULATION OF THE CAVITATION MODELING IN A TURBOPUMP OF LPRE

A. S. Torgashin, D. A. Zhuikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ttarg23@yandex.ru

*The possibility of using computational software packages to simulate cavitation in the stream when designing pumps TNA LRE is considered.*

*Keywords :* LRE, pump, cavitation.

Кавитацией называют частный случай кипения жидкости (фазовый переход жидкости в газ внутри жидкости при определенной температуре и давлении), которое возникает в движущейся жидкости вследствие местных понижений давления до давления насыщенного пара [1]. В гидродинамике явление кавитации играет отрицательную роль, так как вызывает нарушение сплошности среды.

Во время работы ЖРД, насоса ТНА обеспечивает непрерывную подачу компонентов топлива в камеру двигателя. Понижение давления жидкости возникает при обтекании профиля лопаток насоса, что является областью зарождения кавитации. Чем большую скорость имеет поток, обтекающий лопатку, тем больше будет разрежение на лопатке. Поэтому наиболее отдаленная от оси вращения точка входной кромки лопатки может являться центром зарождения кавитации. Учитывая напряженный режим работы ТНА ЖРД, кавитация может повлиять на всю работу ракеты.

Во время проектирования насоса и отработки макетов насосов возникает необходимость подтверждения антикавитационных качеств насосов. Воспроизведение кавитации может проводиться как в лабораторных условиях, так и при помощи различных методов численного моделирования. Учитывая растущие вычислительные мощности персональных компьютеров, с конца предыдущего столетия появляется, и активно развивается специальное программное обеспечение, позволяющее моделировать кавитацию, даже в сложном потоке.

Программное обеспечение, применяемое в вычислительной гидродинамике (CFD), базируется на описывающих движение вязкой ньютоновской жидкости уравнениях Навье–Стокса, включающих в себя урав-

нение движения и неразрывности. Так как в случае с кавитацией, мы имеем дело с моделированием двухфазного потока, используется модель Рэлея–Плессета, полученная из уравнения Навье–Стокса для сферически симметричного пузырька с включением вязкости, поверхностного натяжения и непостоянства давления [2]. Данная модель применяется в модуле ANSYS CFX.

Моделирование кавитации в насосах ТНА ЖРД уже ведется. В своей работе И. С. Казёнов, Ю. И. Канагин, Н. П. Полетаев, И. А. Чернышева [3] предлагают методику расчета срывной кавитационной характеристики при помощи ANSYS CFX, в то время как Степанов Д. В., Шаблий Л. С. [4] проводят моделирование кавитации. Учитывая, что насосам ТНА ЖРД также приходится работать и с криогенными компонентами А. А. Афанасьев, Ю. В. Демьяненко, А. Н. Попков [5] в своей работе рассматривают применение данной кавитационной модели к моделированию криогенных течений.

Несмотря на проводимые исследования по данной области, получение дополнительных статистических данных все еще остаётся важной практической задачей. Авторами статьи ставится дальнейшая задача по проработке зависимостей, полученных при проведении гидропроливов насосов на стендовой базе, и моделировании течения на основе полученных данных.

### Библиографические ссылки

1. Основы гидравлики и аэродинамики : учебник / В. И. Калицун, Е. В. Дроздов, А. С. Комаров, К. И. Чижик. М. : Стройиздат, 2001. 296с.
2. Lin Hao, Brian D. Storey, Andrew J. Szeri. Inertially driven inhomogeneities in violently collapsing

bubbles: the validity of the Rayleigh–Plesset equation // Journal of Fluid Mechanics. 2002. 452 p.

3. Моделирование срывной кавитационной характеристики бустерного турбонасосного агрегата и сравнение экспериментальных и численных результатов / И. С. Казеннов, Ю. И. Каналин, Н. П. Полетаев, И. А. Чернышева // Вестник Самарского аэрокосмического университета. 2014. № 5(47), ч. 1.

4. Степанов Д. В., Шаблий Л. С. Моделирование кавитации в насосах с помощью ANSYS CFX // Королевские чтения : Междунар. молодежная научная конф. Самара : Изд-во СГАУ, 2015.

5. Афанасьев А. А., Демьяненко Ю. В., Попков А. Н. Применение кавитационной модели Релея – Плессета для исследования течения криогенной жидкости в трактах шнекоцентрифужного насоса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017.

### References

1. Fundamentals of hydraulics and aerodynamics : a textbook / V. I. Kalicun, E. V. Drozdov, A. S. Komarov. K. I. Shizhik. Moscow, Strojizdat, 2001. 296 p.

2. Lin Hao, Brian D. Storey, Andrew J. Szeri. Inertially driven inhomogeneities in violently collapsing bubbles: the validity of the Rayleigh–Plesset equation // Journal of Fluid Mechanics. 2002. 452 p.

3. Modeling of stall cavitation sensitivity of a booster turbopump assembly and comparison between experimental and numerical results / I. S. Kazennov, Yu. I. Kanalin, N. P. Poletaev, I. A. Chernysheva // Vestnik Samarskogo aerokosmicheskogo universiteta. 2014. № 5(47), chast 1.

4. Stepanov D. V., SHablij L. S. Simulation of cavitation in pumps using ANSYS CFX // Korolevskie chteniya : Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konf. Samara : Publishing house of SSAU, 2015.

5. Afanas'ev A. A., Dem'yanenko Yu. V., Popkov A. N. Application of Rayleigh-Plesset cavitation model for the analysis of cryogenic fluid flow within the paths of two stage pump // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017.

© Торгашин А. С., Жуйков Д. А., 2019

УДК 621.454.2

## ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ С ТЕПЛОТДАЧЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. А. Яковлев, А. Е. Петецкая, Е. И. Волчкова, А. Л. Вайкус

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: angelina02021999@gmail.com

*Разработан алгоритм расчета течения с учетом теплоотдачи для элементов проточных частей энергетических и силовых установок космических и летательных аппаратов. В качестве основных уравнений использованы уравнения движения и энергии.*

*Ключевые слова: алгоритм расчета, турбина, жидкостный ракетный двигатель, уравнение энергии.*

## FEATURES OF THE ALGORITHM FOR CALCULATING THE FLOW WITH HEAT TRANSFER IN POWER PLANTS OF AIRCRAFT

A. A. Yakovlev, A. E. Petetskaya, E. I. Volchkova, A. L. Vaikus

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: angelina02021999@gmail.com

*An algorithm for calculating the flow taking into account heat transfer for the elements of the flow parts of power and power plants of space and aircraft has been developed. The equations of motion and energy are used as the basic equations.*

*Keywords: calculation algorithm, turbine, liquid rocket engine, energy equation.*

На основе полученных уравнений движения и выражений для определения локального коэффициента теплоотдачи разработан алгоритм расчета течения с теплоотдачей в полостях вращения, позволяющий проводить оптимизацию в области возможных вариаций конструктивных и режимных параметров узлов и агрегатов энергетических установок летательных аппаратов, по основным конструктивным и эксплуатационным параметрам: распределению скоростей, давлений и температур.

При разработке алгоритма расчета вращательного течения по закону «твердого тела»  $\frac{U}{R} = \omega = \text{const}$  с теплоотдачей использованы следующие основные уравнения:

– дифференциальное уравнение угловой скорости ядра потока:

$$\frac{d\omega_{\text{я}}}{dR} = -\frac{2\pi}{\rho\dot{V}} \left( \tau_{0\alpha}^{\text{ст}} - \tau_{0\alpha}^{\text{диск}} \right) - \frac{2\omega_{\text{я}}}{R}; \quad (1)$$

– дифференциальное уравнение статического давления:

$$\frac{dp}{dR} = \rho\omega_{\text{я}}^2 R + \frac{\rho\dot{V}^2}{4\pi^2 z_1^2 R^3} + \frac{1}{z_1} \left( \pm \tau_{0R(\alpha)}^{\text{диск}} \mp \tau_{0R(\alpha)}^{\text{ст}} - \tau_{0R(p)}^{\text{диск}} - \tau_{0R(p)}^{\text{ст}} \right). \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения скорости и давления, полученные при интегрировании уравнений движения для вращательного течения.

Данная система уравнений течения решается совместно с уравнениями поддержки и представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, приведенных к стандартному виду для численного интегрирования.

Уравнения течения дополняются уравнением энергии:

$$h = C_p(T + 273) + \frac{C^2}{2} - \frac{Q}{\dot{m}} + \frac{N}{\dot{m}}, \quad (3)$$

куда входят тепловой поток, определяемый с помощью полученных аналитических выражений для локального коэффициента теплоотдачи, и диссипация энергии трения.

Уравнения течения и энергии замыкаются уравнением состояния

$$pv = RT. \quad (4)$$

Данная система уравнений представляет замкнутую систему уравнений, совместное решение которой позволяет определить температурное поле в потоке, распределение скоростей и давлений, а также дает возможность определить распределение локального коэффициента теплоотдачи для всех точек поверхности. Совокупность упомянутых уравнений называется общим аналитическим описанием теплоотдачи.

Основным преимуществом алгоритма по сравнению с алгоритмами, основанными на эмпирических зависимостях, является относительно широкая область применения. Алгоритм расчета течения с теплоотдачей в стенку реализован в программное обеспечение, которое позволяет рассчитывать полости тече-



ния различной формы, строить двумерные семейства характеристик различных параметров потока в зависимости от геометрических и режимных параметров.

#### Библиографические ссылки

1. Зуев А. А., Назаров В. П., Арнгольд А. А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использование модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.
2. Зуев А. А., Павлыш А. А. Исследование течения с теплоотдачей в стенку в граничных условиях агрегатов подачи энергетических установок летательных аппаратов // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. 2014. Т. 1. С. 137–138.
3. Интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя / А. А. Зуев, В. О. Фальков, В. А. Панченко, А. А. Филиппов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2010. № 2 (17). С. 37–42.
4. Кишкин А. А., Зуев А. А., Леонов В. П. Локальная теплоотдача в граничных условиях турбомашин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1(658). С. 3–10.
5. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя с конвективной составляющей в полостях вращения ТНА ЖРД / А. А. Зуев, В. Ю. Пиунов, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19, № 2. С. 30–44.

#### References

1. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A. [The local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the cavities of rotation of the gas turbines] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2019. Vol. 26, № 2. P. 99–115.
2. Zuev A. A., Pavlysh A. A. [Issledovaniye techeniya s teplootdachey v stenu v granichnykh usloviyakh agregatov podachi energeticheskikh ustanovok letatelnykh apparatov] // Reshetnevskiy chteniya : Materials Intern. scientific conf.. 2014. Vol. 1. P. 137–138.
3. Integral relation of the energy equation of the temperature spatial boundary layer / A. A. Zuev, V. O. Falkov, V. A. Panchenko, A. A. Filippov // Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solovyeva. 2010. № 2 (17). P. 37–42.
4. Kishkin A. A., Zuev A. A., Leonov V. P. [Local heat transfer in the boundary conditions of turbomachines] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye, 2015. № 658. P. 3–10.
5. Determination of the local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the rotation cavities of the LRE turbopump / A. A. Zuev, V. Yu. Piunov, V. P. Nazarov, A. A. Arngold // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. 2019. Vol. 19, № 2. P. 30–44.

© Яковлев А. А., Петецкая А. Е., Волчкова Е. И., Вайкус А. Л., 2019



**Секция**

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОНСТРУКЦИЯХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВАКУУМНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

А. О. Булов, М. А. Ермаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: tema\_bulov@mail.ru

*Рассматриваются вакуумные холодильные системы, работающие на воде. Представлена конструкция системы. Произведено сравнение холодильных циклов. Проанализированы достоинства и недостатки. Сделаны выводы о перспективе использования таких систем в будущем.*

*Ключевые слова: вакуумные холодильные машины, вакуумный насос, холодильный агент.*

## THE PROSPECTS OF VACUUM REFRIGERATION MACHINES DEVELOPMENT

A. O. Bulov, M. A. Ermakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tema\_bulov@mail.ru

*The article describes vacuum refrigeration systems that operate on water. Authors of the article represent the system design, compare refrigeration cycles, analyze advantages and disadvantages of vacuum refrigeration machines, and conclude about prospects of using such systems in the future.*

*Keywords: vacuum refrigeration machines, vacuum pump, refrigerating agent.*

Холодильная промышленность относится к энергоёмкому производству. Под энергоёмкостью понимается количество топливно-энергетических ресурсов, необходимых для изготовления, ремонта, технического обслуживания и утилизации оборудования. Проблемы повышения цен на такие ресурсы, ведут к разработке новых промышленных и востребованных инновационных технологий. Кроме этого, экологическая обстановка в стране занимает одно из важных мест. Поэтому создание не только энергетически выгодных холодильных машин, но и экологически чистых и безопасных машин для окружающей среды, является более перспективным направлением исследования.

В настоящее время в качестве рабочего тела в холодильных машинах получили распространения аммиак и фреоны. Эти хладагенты оказывают серьезное влияние на экологию всей планеты. Так фреоны содержат фторовые соединения, которые улетучиваются в атмосферу при утечке, а это влечет за собой разрушение озонового слоя земли. Применение экологически чистых рабочих тел в холодильных машинах, также является актуальным направлением исследования.

Альтернативой фреонов может стать экологически чистое и безопасное вещество – вода. Вода не загрязняет окружающую среду и не создает эффекта глобального потепления, который в свою очередь несет за собой необратимые процессы в природе (рис. 1) [1].

Применение воды в холодильных машинах, имеет давнюю историю. Еще в 1755 году, В. Каллен замо-

раживал воду под стеклянной колбой, откачивая из нее воздух и пары воды [2].

Хладагент	GWP	ODP	Группа токсичности
R12	4600	1,0	A1
R22	1700	0,034	A1
R134a	1300	0	A1
R123	120	0,012	A1
Вода	<1	0	A1
Аммиак	0	0	B2
CO <sub>2</sub>	1	0	A1

Рис. 1. Сравнение характеристик холодильных агентов

Вода как холодильный агент имеет ряд особенностей, это позволяет говорить об установках, в которых она используется, как об отдельном классе холодильных машин.

Вакуумные холодильные системы, использующие воду в качестве холодильного агента можно разделить на 3 группы: системы для охлаждения воды, замораживания воды и трансформации. Все эти системы объединяются едиными процессами теплообмена и связанными с фазовыми переходами воды в условиях вакуума.

Основной цикл работы машин работающих на воде фактически идентичен пароконденсационному холодильному циклу с традиционными холодильными агентами, за исключением того что вода является дешевым веществом, делает возможность использовать ее в разомкнутом цикле.

Несмотря на это, вода как холодильный агент имеет очень низкий уровень рабочих давлений, в результате чего система должна пропускать большие объемные потоки водяного пара и отношения давления (рис. 2) [1].

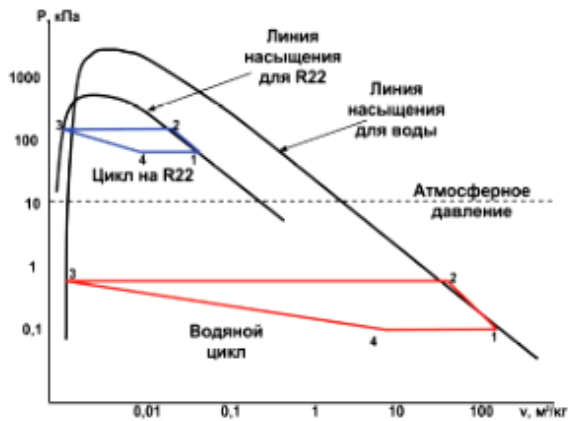


Рис. 2. Сравнение циклов на основе воды и R22 (при замкнутом цикле)

В настоящее время в низкотемпературной лаборатории кафедры техники низких температур им. П. Л. Капицы Московского государственного машиностроительного университета проводят систематические исследования вакуумных холодильных машин на базе бесконтактных насос-компрессоров. Отличительной особенностью процесса компримирования подобных машин является отсутствие сжатия паров воды в проточной части, что исключает конденсацию пара в проточной части машины, процесс сжатия происходит в выхлопном патрубке. В отличие от насос-компрессоров с внутренним сжатием (поршневым, винтовым, многоступенчатым вращательных, спиральных) в двухроторном насос-компрессорах степень сжатия может достигать 10 и 12 ед. с приемлемыми значениями коэффициента подачи.

На рис. 3 показана схема вакуумного водоохладителя периодического действия. Процесс охлаждения при этом инициируется за счет понижения давления упругости паров над зеркалом воды, массообменные процессы проходящие при этом можно разделить две стадии. Первая стадия – дегазация охлаждаемой массы воды, которая сопровождается бурным вскипанием верхней части слоя воды. Вторая стадия характеризуется пузырьковым кипением, при этом темп понижения давления существенно ниже.

Как показали результаты испытаний, вакуумно-испарительной холодильной машины, при работе с водяным конденсатором расход энергии на охлаждения воды до околонулевых температур в среднем на 12–16 % ниже, чем в пароконденсационных холодильных машинах на хладонах [3].

Мировыми лидерами по производству вакуумных холодильных машин в настоящее время являются компания DTI из Дании, и компания IDE из Израиля. DTI работает над созданием вакуумно-испарительных установок, работающих на воде. IDE являются лидерами по производству центробежных компрессоров для водяного пара.

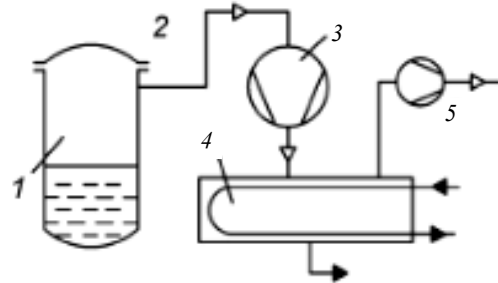


Рис. 3. Вакуумный водоохладитель:  
1 – испаритель; 2 – форсунка для распыления воды;  
3 – вакуумный – насос-компрессор; 4 – конденсатор;  
5 – вспомогательный вакуумный насос

Кроме этого, известны проекты по производству и внедрению вакуумных холодильных машин в США, Китае, Германии, Норвегии, Швеции.

В России еще в конце 80-х годов прошлого века были созданы опытный стенд по вакуумно-испарительному охлаждению жидкостей и были получены патенты РФ на способ получения искусственного холода [4; 5].

Основными достоинствами таких холодильных систем являются:

- простая технологическая схема холодильной установки;
- низкая стоимость конструкций;
- экологически чистая система;
- низкий уровень потребляемой энергии (по сравнению с пароконденсационными холодильными машинами).

К основному недостатку таких систем относится низкий рабочий уровень давления, это приводит к большим объемным потокам водяного пара. Данный недостаток может быть скомпенсирован тем, что вода является неисчерпаемым источником энергии.

Делая выводы о перспективах использования вакуумных холодильных систем в будущем, нужно отметить, что данное направление является актуальным, но требует более глубокого и детального исследования. Наряду с этим можно делать выводы о том, что данное направление, в связи с экономическими и экологическими проблемами, в будущем выглядит очень перспективно.

#### Библиографические ссылки

1. Калнинь И. М., Маринюк Б. Т., Крысанов К. С. Вакуумно-испарительные холодильные системы // Вестник МАХ. 2013. № 1. С. 34–38.
2. D’Orsi N. C., LeDrew B. A., Wight S. E. The efficiency limits of water vapor compressors // Concepts. ETI. 2000.

3. Marinyuk B. T., Krysanov K. S., Ermolaev A. E. Vacuum-evaporative refrigeration and ice generation installation // 22nd international congress of refrigeration, Refrigeration creates the future. Beijing, P. R. China. August 21–26, 2007.

4. Пат. 2178128 Российская Федерация, МПК F 25 D 31/00. Способ охлаждения жидкостей / Маринюк Б. Т. № 2000102331/06 ; заявл. 02.02.2000 ; опубл. 10.01.2002, Бюл. № 20.

5. Пат. 2215247 Российская Федерация, МПК F 25 D 1/00/ Вакуумная холодильная установка для охлаждения жидкости / Маринюк Б. Т. № 2001117616/13 ; заявл. 28.06.2001 ; опубл. 27.10.2003, Бюл. № 17.

#### References

1. Kalnin I. M., Marinyuk B. T., Krysanov K. S. Vacuum-evaporative refrigeration systems // Vestnik of

International Academy of Refrigeration. 2013. № 1. С. 34–38.

2. D’Orsi N. C., Le Drew B. A., Wight S. E. The efficiency limits of water vapor compressors. Concepts. ETI. 2000.

3. Marinyuk B. T., Krysanov K. S., Ermolaev A. E. Vacuum-evaporative refrigeration and ice generation installation // 22nd international congress of refrigeration, Refrigeration creates the future. Beijing, P. R. China. August 21–26, 2007.

4. Marinyuk B. T. Liquid cooling method. RF patent, № 2178128 ; filed February 2th, 2000 ; publised January 10th, 2002.

5. Marinyuk B. T. Vacuum cooling set to cool liquid. RF patent, № 2215247 ; filed July 20th, 2003 ; published October 27th, 2003.

© Булов А. О., Ермаков М. А., 2019

УДК 536.212

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

И. М. Васильев, А. А. Дементьев\*

АО «НПЦ «Полус»  
Российская Федерация, 634045, г. Томск, Кирова просп., 56в  
\*E-mail: daa024@mail.ru, info@polus-tomsk.ru

*Исследована возможность использования эффекта Зеебека для контроля контактного термического сопротивления в бортовой аппаратуре между источниками и стоками тепла. Разработана математическая модель теплопередачи.*

*Ключевые слова: эффект Зеебека, контактное термосопротивление, математическое моделирование, теплопередача.*

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL HEAT TRANSFER STUDY TAKING INTO ACCOUNT CONTACT THERMAL RESISTANCE

I. M. Vasiliev, A. A. Dementev\*

Stock Company "Scientific & Industrial Centre "Polyus"  
56v, Kirova Av., Tomsk, 634045, Russian Federation  
\*E-mail: daa024@mail.ru, info@polus-tomsk.ru

*The possibility of using the Seebeck effect to control contact thermal resistance in on-board equipment between sources and sinks of heat has been investigated. Mathematical model of heat and mass transfer is developed.*

*Keywords: Seebeck effect, contact thermal resistance, mathematical modeling, heat transfer.*

**Введение.** Тепловые режимы бортовой аппаратуры при работе полупроводниковых приборов зависят от мощности используемых электрорадиоизделий (ЭРИ) и эффективности теплоотвода. Обеспечение этих режимов для изделий ракетно-космической отрасли затрудняется высокими требованиями к их массогабаритным характеристикам и отсутствием конвективной составляющей при теплопереносе. Для того чтобы обеспечить соответствующие рабочие режимы, тепловую энергию от источников перераспределяют по магистралям на узлы с более низкой температурой либо на корпус изделия, где поступающее тепло переходит в окружающее пространство. В случае вакуума это происходит за счет излучения. В зоне контакта источников тепловыделения со стоками, которые конструктивно являются разными твердыми телами, возникает контактное термическое сопротивление, препятствующее свободному распространению тепла. С целью его уменьшения обеспечивают более высокую чистоту контактирующих поверхностей, используют пайку либо вводят в зону контакта теплопроводящий компаунд, реализуя соответствующий термоинтерфейс между стоком и источником тепла. Важно знать значение теплового сопротивления контактного слоя на протяжении всего срока эксплуатации изделия. Одним из способов контроля качества теплопроводящего слоя, в том числе после завершения монтажа, может послужить использование эффекта Зеебека [1].

**Целью работы** является проверка возможности определения контактного теплового сопротивления с помощью термоэлектрического эффекта. Для этого разработана математическая модель распространения тепла, проведен эксперимент, сопоставлены экспериментальные и расчетные данные, параметрически исследованы зависимости разности температур на границах контакта твердых тел от теплопроводности и толщины термоинтерфейса, рассчитано температурное поле системы цилиндров от начального момента времени до установления стационарного режима, на основе экспериментальных данных вычислено значение термосопротивления.

Экспериментальная установка состоит из двух цилиндров, выполненных из алюминиевого сплава АМц ГОСТ 21631–76, радиусом  $R$  и высотой  $L_1$  и  $L_2$ , соединенных друг с другом (рис. 1). Первый цилиндр помещен в сосуд с кипящей водой (расстояние  $AD$ ). Второй цилиндр и верхняя часть первого охлаждаются воздухом (отрезок  $DC$ ). Между контактирующими торцами цилиндров находится теплопроводящий слой толщиной  $d$ , (расстояние  $B_1B_2$ ). На цилиндрах в точках  $C$  и  $E$  установлены термодпары для определения разности температур, а также зачеканены медные проводники для фиксации значения термоЭДС.

Предположения математической модели: контакт между цилиндрами и контактным слоем – идеальный; коэффициенты теплопроводности веществ не зависят от температуры; тепловое сопротивление, возникаю-

щее в зоне контакта двух цилиндров, полностью определяется эффективным сопротивлением контактного слоя; температура кипящей воды постоянна и равна  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; теплопередача осуществляется за счет теплопроводности и конвекции [2; 3].

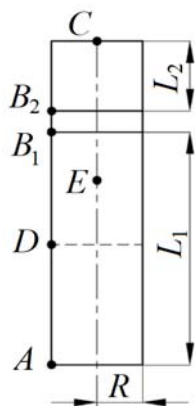


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Математическая модель включает в себя одномерное уравнение теплопроводности с правыми частями, начальные и граничные условия. Для формулировки конечно-разностного аналога уравнения теплопроводности используется неявная разностная схема, которая решается методом прогонки.

Программный код реализован на языке программирования Fortran.

**Результаты.** На рис. 2 показан процесс установления теплового равновесия для рассматриваемой установки. Экспериментальные значения температур  $T_E$  и  $T_C$  (рис. 2) определены с помощью термодатчиков, разность температур  $T_E - T_C$  получена измерением термоЭДС. Из обобщения экспериментальных данных

вычислено значение разности температур ( $\Delta T = 4,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на границах слоя ( $d = 0,1\text{ мм}$ ). Далее методом подбора было найдено значение эффективной теплопроводности слоя ( $\lambda = 0,061\text{ Вт/м/К}$ ), при котором модельная разность температур совпадает с экспериментальной. Модель хорошо описывает экспериментальные данные – различие между соответствующими значениями установившейся температуры в точках  $E$  и  $C$  не превышает 4%. Имеющиеся различия в значениях объясняются неидеальностью экспериментальной установки и погрешностями, вносимыми измерительными приборами (термодатчики, вольтметр, осциллограф).

Параметрическое исследование показало, что при фиксированной толщине и увеличении термосопротивления слоя разность температур нелинейно увеличивается, т. е. если с течением времени теплопроводный слой начнет терять свои теплопроводящие свойства, это можно отследить по изменению разности температур.

**Выводы.** Сравнение экспериментальных и расчетных данных при теплопереносе с учетом теплового сопротивления показало адекватность разработанной математической модели. Результаты параметрического исследования подтверждают увеличение градиента температур на границах теплопроводящего слоя при ухудшении его теплопроводящих свойств. Таким образом, можно сделать заключение о возможности использования эффекта Зеебека для определения контактного теплового сопротивления и контроля качества реализации термоинтерфейса.

Для дальнейших исследований представляет интерес эксперимент с термопастами, обладающими различной теплопроводностью, контактными поверхностями, имеющими несколько значений шероховатости, в математической модели следует учесть теплопередачу излучением.

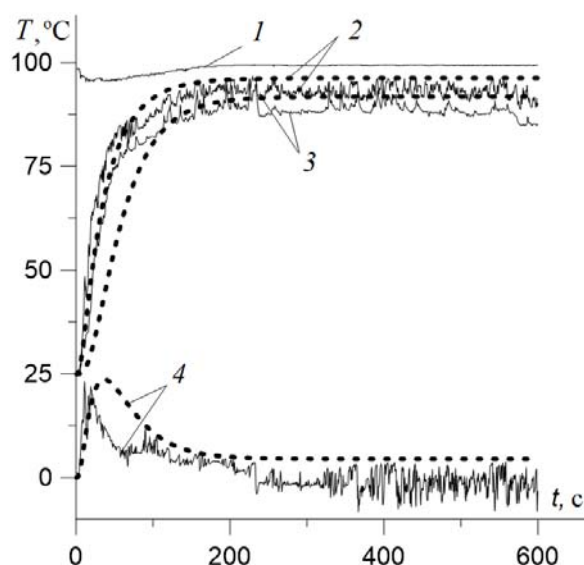


Рис. 2. График зависимости температуры от времени. Значения температуры: 1 – воды; 2 – в верхней части цилиндра, точка  $C$ ; 3 – в точке  $E$ ; 4 – разность  $T_E - T_C$ ; сплошная линия – экспериментальные данные; пунктирная – модельные значения

**Библиографические ссылки**

1. Путилов К. Курс физики. Учение об электричестве : учеб. пособие. М. : Гостехтеориздат, 1954. 156 с.
2. Тихонов А., Самарский А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1972. 555 с.
3. Цирельман Н. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса. Ч. I : учеб. пособие / Уфим. гос. авиац.-техн. ун-т. Уфа, 2002. 108 с.
4. Марчук Г. Методы вычислительной математики. М. : Наука, 1989. 608 с.
5. Крайнов А. Ю., Рыжих Ю. Н., Тимохин А. М. Численные методы в задачах теплопереноса / Том. гос. ун-т. Томск, 2009. 114 с.

**References**

1. Putilov K. *Kurs fiziki uchenie ob electrichestve* [The Theory of Electricity]. Moscow, Gostehtheorizdat Publ., 1954. 156 p. (In Russ.)

2. Tihonov A., Samarskiy A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 555 p. (In Russ.)
3. Tsirel'man N. *Teoriya i prikladnye zadachi teplomassoperenosa* [Theory and applied problems of heat and mass transfer]. Ufa : UGATU Publ., 2002. 108 p. (In Russ.)
4. Marchuk G. *Metody vychislitel'noy matematiki* [Methods of computational mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 608 p. (In Russ.)
5. Kraynov A. Yu., Ryzhih U. N., Timohin A. M. *Chislennyye metody v zadachah teploperenosa* [Numerical methods in heat transfer problems]. Tomsk : TSU Publ., 2009. 114 p. (In Russ.)

© Васильев И. М., Дементьев А. А., 2019



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

А. В. Делков, Е. К. Умников, Г. Г. Ларин, С. В. Рудко, Э. Б. Шейдаев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*Рассматривается постановка задачи численного моделирования свободной тепловой конвекции в прямоугольной области при различном расположении источников тепла. Приводятся результаты численного моделирования задачи в пакете FreeFEM.*

*Ключевые слова: свободная тепловая конвекция, численное моделирование, теплообмен, источники тепла.*

## NUMERICAL MODELING OF FREE HEAT CONVECTION AT DIFFERENT LOCATION OF HEAT SOURCES

A. V. Delkov, E. K. Umnikov, G. G. Larin, S. V. Rudko, E. B. Sheydayev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*This article considers the statement of the problem of numerical simulation of free thermal convection in a rectangular region with different locations of heat sources. The results of numerical simulation of the problem in the FreeFEM package are presented.*

*Keywords: free thermal convection, numerical simulation, heat transfer, heat sources.*

Задача моделирования свободной конвекции возникает при анализе режимов работы систем обеспечения тепловых режимов в замкнутых помещениях и герметичных отсеках при наличии газовой или жидкостной сплошной среды [1]. При этом перенос тепла осуществляется за счет масс среды, меняющей свою плотность в зависимости от температуры в поле гравитационных сил. В настоящей работе рассматривается вопрос моделирования свободной тепловой конвекции в плоской прямоугольной расчетной области при различном расположении источников тепла.

Характерной особенностью математической модели естественной конвекции является отсутствие допущения несжимаемости среды: плотность должна изменяться в зависимости от температуры [2]. Расчетный случай для моделирования задачи свободной конвекции является сопряженным: одновременно должны быть решены уравнения движения и энергии. Результатом решения данной системы уравнений являются определенные поля температуры и скорости в расчетной области.

Одним из основных подходов к решению задачи свободной конвекции является приближение Буссинеска [3; 4]. Идея метода Буссинеска заключается в допущении учета изменения плотности в зависимости от температуры только при расчете массовой силы. Во всех других соотношениях плотность остается постоянной.

Рассмотрим систему уравнений свободной конвекции в приближении Буссинеска [5]. Для моделиро-

вания движения среды используется уравнение Навье–Стокса:

$$\rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \cdot \nabla u \right) + \nabla p - \mu \Delta u = \rho(T)g, \quad (1)$$

где  $u$  – скорость;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho(T)$  – изменяемая плотность;  $\rho_0$  – постоянная плотность;  $\tau$  – время;  $\mu$  – вязкость.

Изменение плотности определяется по линейному закону:

$$\rho(T) = \rho_0 + \beta(T - T_0), \quad (2)$$

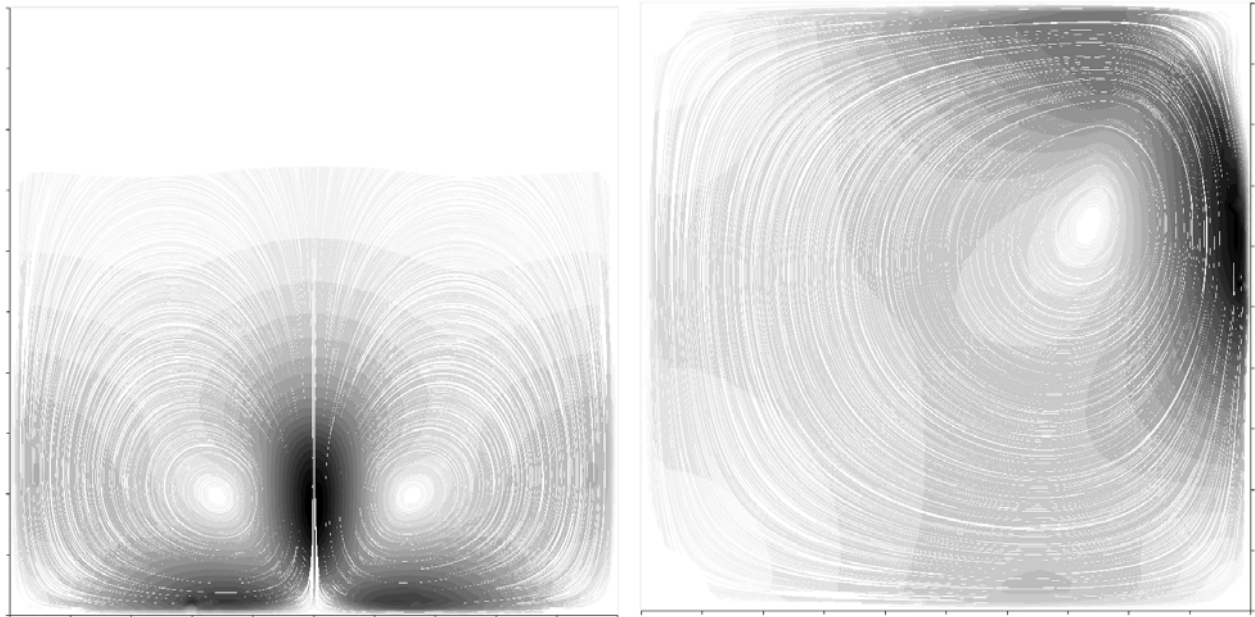
где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения.

Для учета теплообмена в воздушной среде используется уравнение энергии:

$$\rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho_0 c_p u \cdot \nabla T - \nabla(k \nabla T) = 0, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – теплоемкость.

По приведенным уравнениям был разработан алгоритм расчета в пакете для численного решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов FreeFEM. Задача была разделена на две стадии на каждом шаге решения: сначала (на первом шаге) решалось уравнение энергии, и устанавливалась картина распределения температур в расчетной области. После этого по температуре пересчитывалось поле распределения плотности. Затем (на втором шаге) решалось уравнение движения с определением компонентов скоростей.



Линии тока в прямоугольной расчетной области при горизонтальном (слева) и вертикальном (справа) расположении источника тепла

Решение реализовывалось в прямоугольной расчетной области. В качестве тестовой задачи были исследованы характерные случаи расположения источника тепла на границе области на горизонтальной и вертикальной стенке при воздействии на систему постоянного ускорения свободного падения  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ . Линии тока для данных случаев представлены на рисунке.

Для случая горизонтального расположения источника тепла в двумерной прямоугольной области наблюдаются два симметричных вихря переноса массы вещества. Максимальная скорость переноса достигается в центральной зоне над источником тепла.

Для случая вертикального расположения источника тепла на правой стенке внутри прямоугольной области возникает один несимметричный вихрь, при этом максимальная скорость переноса достигается у границы области вблизи источника тепла.

Результаты численного исследования соответствуют физической постановке задачи и имеющимся экспериментальным данным, из чего можно сделать вывод о качестве и адекватности математической модели. Модель может быть использована для анализа более сложных случаев: наличия нескольких источников тепла различной геометрии, нестационарности и т. д.

Моделирование задачи свободной конвекции позволяет произвести оценку эффективности теплопереноса в газовой или жидкостной среде при различных конструктивных и режимных параметрах.

## References

1. Majumdar P. Computational methods for heat and mass transfer. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2006. 717 p.
2. Rajkumar M. R., Venugopal G., Anil Lal S. Numerical study of natural convection from a heat generating element using a locally divergence free FEM and comparison with experiment. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012. Vol. 39, № 4. P. 530–536. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.02.004
3. Bilgen E. Conjugate heat transfer by conduction and natural convection on a heated vertical wall. Applied Thermal Engineering, 2009. Vol. 29, № 2–3. P. 334–339. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.02.038
4. Zubkov P. T., Kanashina (Safiullina) M. V., Kalabin E. V. Heat transfer from the cold wall of a square cavity to the hot one by oscillatory natural convection. ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, April 2004. Begell House, New York, 2004.
5. Zubkov P. T., Kalabin E. V., Kanashina (Safiullina) M. V. Natural-convective heat transfer in a square cavity with time-varying side-wall temperature. Numerical Heat Transfer: Part A: Applications. 2005. Vol. 47, № 6. P. 621–631.

© Делков А. В., Умников Е. К., Ларин Г. Г., Рудко С. В., Шейдаев Э. Б., 2019

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ КОНВЕКТИВНОЙ ЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

А. А. Кишкин, А. В. Хахленков, М. А. Ермаков, М. У. Абдуллаев, Д. В. Потес

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: aa\_kishkin@sibsau.ru

*Системы охлаждения получили широкое распространение в космической технике для обеспечения тепловых режимов работающего оборудования, силовых конструкций, датчиков и антенн. Одним из распространенных вариантов реализации системы охлаждения является конвективный жидкостный контур. В настоящей работе рассматриваются вопросы моделирования жидкостного контура, приводятся экспериментальные данные.*

*Ключевые слова: система терморегулирования, жидкостный контур, теплообмен, моделирование.*

## MODELING OF OPERATING MODES OF A CONVECTIVE LIQUID COOLING SYSTEM

A. A. Kishkin, A. V. Khakhlenkov, M. A. Ermakov, M. U. Abdullaev, D. V. Potes

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: aa\_kishkin@sibsau.ru

*Cooling systems are widely used in space technology to provide thermal conditions for operating equipment, power structures, sensors and antennas. One of the common options for implementing a cooling system is a convective fluid circuit. In this article we consider the problems of modeling a fluid circuit, and provide experimental data.*

*Keywords: temperature control system, liquid circuit, heat transfer, modeling.*

Современные космические аппараты отличаются значительной технической сложностью и объединяют несколько основных подсистем для контроля, управления и обеспечения работоспособности. Одной из основных подсистем космического аппарата является система терморегулирования (СТР). СТР предназначена для обеспечения тепловых режимов различного оборудования и конструкций [1; 2].

В настоящей работе рассматривается моделирование жидкостного контура охлаждения. Конструктивно контур (рис. 1) представляет собой два теплообменных аппарата, внутри которых циркулирует теплоноситель. Один теплообменный аппарат (ТА) предназначен для отвода тепла приборов или охлаждаемых конструкций, второй (радиатор Р) – для сброса отведенного тепла в окружающее пространство. Также в контуре предусмотрены насос Н и бак-аккумулятор Б.

В качестве рабочего тела такой системы используется жидкость с параметрами, подходящими по температурному диапазону [3]. Расположение труб в составе теплообменных аппаратах может иметь различную топологию.

Задача расчета жидкостного контура относится к поточной термодинамике. Основную сложность вызывает определение изменения температуры теплоносителя (а значит и его теплофизических свойств)

при движении по контуру. Изменение температуры оказывает существенное влияние на удельные тепловые потоки, в результате чего теплообмен происходит неравномерно [4; 5].

В рамках настоящей работы была разработана математическая модель нестационарного режима работы жидкостного контура системы охлаждения. Для проверки модели на работоспособность решалась следующая тестовая задача. В качестве рабочего тела была использована вода с постоянными (не зависящими от температуры) теплофизическими параметрами. Для охлаждаемого прибора теплоемкость 1000 Дж/кг-К, масса 1 кг. Расход теплоносителя 0,01 кг/с. Для каждого из теплообменных аппаратов использовался диаметр труб 5 мм, длина трубы 0,5 м. Термическое сопротивление стенок каждого теплообменника 10 К/Вт. В качестве начальных параметров задавались температура воды и прибора 20 °С. Температура окружающего воздуха 20 °С. Внутреннее тепловыделение прибора 100 Вт. Для охлаждаемого прибора устанавливалась циклическая нагрузка прибора с периодом 5000 с. При этом контролировались температуры теплоносителя в различных точках контура и температура охлаждаемых приборов. Для случая циклической нагрузки прибора характерные температуры в системе представлены на рис. 2.

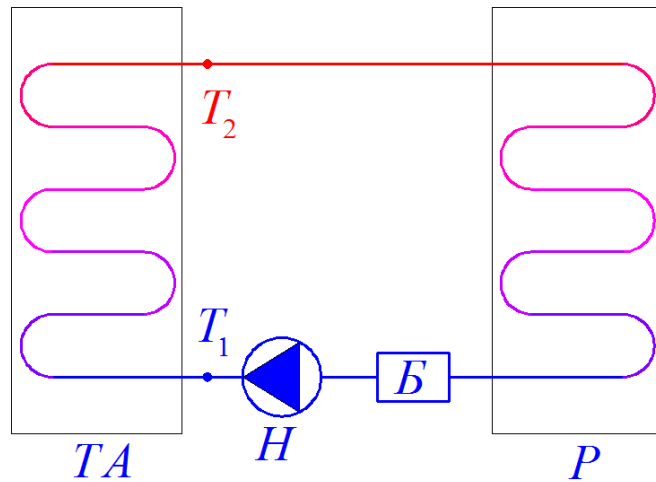


Рис. 1. Схема конвективного жидкостного контура системы охлаждения

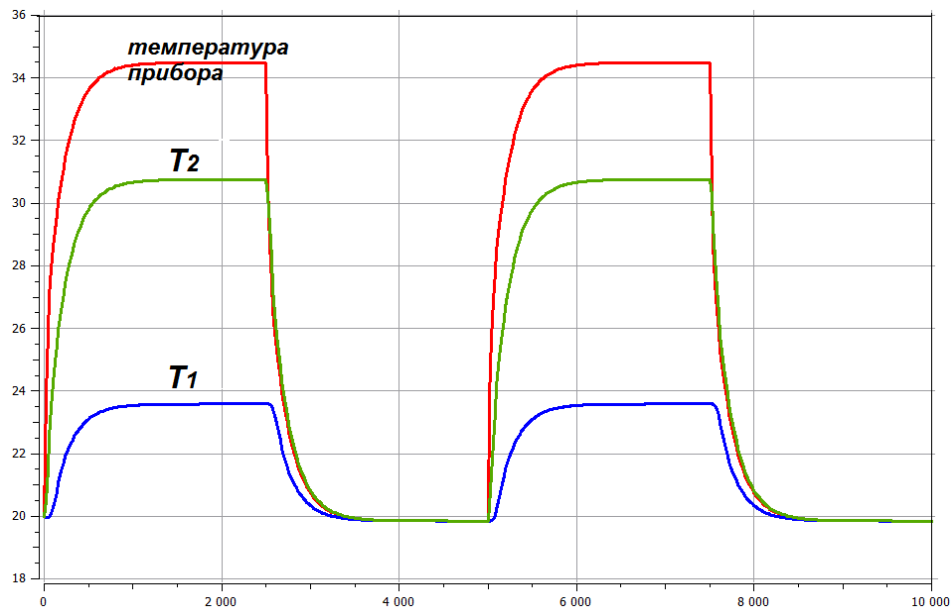


Рис. 2. Изменение характерных температур в системе при циклической нагрузке ( $T_1$ ,  $T_2$  – температуры на входе и выходе из ТА)

Из графиков изменения температуры видно, что из-за малой теплоемкости при отключении нагрузки прибор и теплоносители остывают практически одновременно. При снятии нагрузки температура прибора сравнивается с температурой окружающей среды. В таком состоянии тепловая нагрузка на контур отсутствует.

В целом результаты тестовой задачи хорошо согласуются с физической постановкой, а значит модель может быть использована для дальнейших исследований.

В работе была рассмотрена одна из самых простых систем охлаждения. Однако использованный метод позволяет рассматривать системы любой сложности. Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с математической постановкой задачи и

имеющимися данными. Разработанная авторами математическая модель может быть использована для расчета параметров контура и для проведения его многовариантной оптимизации.

#### Библиографические ссылки

1. Meseguer J., Perez-Grande I. *Spacecraft Thermal Control*. Woodhead Publishing Limited, 2012. 413 p.
2. Рудько А. А., Юртаев Е. В., Двирный В. В. Система терморегулирования космического аппарата на основе тепловых труб и активного жидкостного контура // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2011, г. Красноярск) : в 2 ч. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 89–90.

3. Морковин А. В., Плотников А. Д., Борисенко Т. Б. Теплоносители для внутренних контуров систем терморегулирования пилотируемых космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 79–87.

4. Андриющенко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М. : Высш. шк., 1967. 267 с.

5. Delcov A. V., Hodenkov A. A., Zhuikov D. A. Mathematical modeling of single-phase thermal control system of the spacecraft // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE Proceedings. 2014. P. 591–593.

#### References

1. Meseguer J., Perez-Grande I. Spacecraft Thermal Control. Woodhead Publishing Limited, 2012. 413 p.

2. Rudko A. A., Yurtayev E. V., Dvirniy V. V. Sistema termoregulirovaniya kosmicheskogo apparata na osnove teplovykh trub [Thermal control system of a spacecraft based on heat pipes and an active liquid circuit] // Reshetnevskiyе chteniya : materialy XV

Mezhdunar. nauch. konf. [Reshetnev readings : Materials Intern. Scientific.Conf.]. Krasnoyarsk, 2011. P. 89–90.

3. Morkovin A. V., Plotnikov A. D., Borisenko T. B. Teplonositeli dlya vnutrennikh sistem termoregulirovaniya pilotiruyemykh kosmicheskikh apparatov [Coolants for the internal circuits of thermal control systems of manned spacecraft]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii [Space engineering and technology]. 2013. № 1. P. 79–87.

4. Andryushchenko A. I. Osnovy tekhnicheskoy termodinamiki real'nykh protsessov [Fundamentals of technical thermodynamics of real processes]. M. : Higher school, 1967. 267 p.

5. Delcov A. V., Hodenkov A. A., Zhuikov D. A. Mathematical modeling of single-phase thermal control system of the spacecraft. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE Proceedings. 2014. P. 591–593.

© Кишкин А. А., Хахленков А. В., Ермаков М. А.,  
Абдуллаев М. У., Потес Д. В., 2019

УДК 536.2.08

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. А. Ходенков, Э. В. Ходенкова

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

*Рассматривается вопрос автоматизации теплотехнических измерений при испытаниях теплоэнергетических установок. Особое внимание уделяется использованию термопар для измерения температуры потока. Приводится описание автоматизированной системы регистрации сигналов на основе контроллеров National Instruments.*

*Ключевые слова: автоматизация теплотехнических измерений, теплоэнергетическая установка, измерительный комплекс.*

## MEASURING COMPLEX FOR TESTING OF HEAT-POWER PLANTS

A. A. Khodenkov, E. V. Khodenkova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: hodenkov.aa@gmail.com

*This article considers the issue of automation of thermal engineering measurements during testing of heat power plants. Particular attention is paid to the use of thermocouples for measuring the flow temperature. A description of the automated signal recording system based on National Instruments controllers is given.*

*Keywords: automation of heat engineering measurements, heat power plant, measuring complex.*

Теплоэнергетические установки используются во многих отраслях современного промышленного производства, обеспечивая преобразование энергии различных типов. Для контроля работы теплоэнергетических установок, оценки их энергетической эффективности в рамках испытаний и разработки мероприятий по их оптимизации необходима система фиксации основных термодинамических параметров. Таким образом, вопрос автоматизации измерений при проведении испытаний теплоэнергетических установок в настоящее время является актуальным.

В настоящей работе рассматривается вопрос разработки автоматизированной системы измерений для паросиловых энергоустановок на низкокипящем рабочем теле. Использование подобных установок позволяет увеличить КПД имеющихся тепловых двигателей или задействовать тепловые источники, недоступные для пароводяных турбин и котлов. А применение данных установок для энергообеспечения космических аппаратов позволит существенно продлить жизненный цикл аппаратов и повысить их надежность.

Особенностью функционирования системы измерений параметров для паросиловой энергоустановки является необходимость измерения параметров потока рабочего тела в каналах и полостях, что обуславливает ряд специфических требований: низкая инерционность измерительных узлов, отсутствие загромождения проходных сечений, возможность автома-

тической фиксации значительного объема данных при переходных процессах.

Авторами была создана автоматизированная система измерений термодинамических параметров на основе контроллеров National Instruments. Система позволяет измерять и фиксировать следующие параметры: температуру потока, полное и статическое давление, расход рабочего тела. Особое внимание уделялось контролю температуры как основного параметра термодинамического процесса.

Контроль измеряемой температуры потока рабочего тела осуществляется с помощью термопар  $k$ -типа, на рис. 1 представлена схема заделки термопары по длине трубопровода в первом и втором контуре.

Заделка термопары температуры рабочего тела осуществляется в соединитель 5, по средствам резьбового соединения для обеспечения герметичности. Конструктивно данный датчик представляет собой болт М5 ГОСТ 7805–70 с просверленным по вертикальной оси отверстием 1,5 мм и с монтируемой термопарой  $k$ -типа с помощью эпоксидного клея, для обеспечения герметичности (см. рис. 2).

Данное исполнение датчиков и выбранный тип термопар с непосредственным погружением в измеряемую среду позволяет уменьшить погрешность измерения и снизить тепловую инертность контроля температуры, что особенно важно при измерении температуры движущегося потока в трубах малого диаметра [1–5].

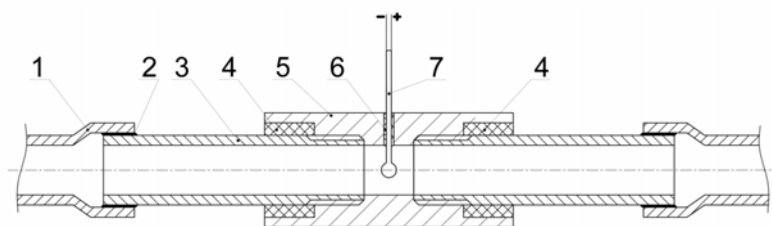


Рис. 1. Схема исполнения заделки термопары температуры потока Т1-Т12:  
1 – основной трубопровод; 2 – пайка; 3 – штуцер; 4 – уплотнительный материал;  
5 – соединитель; 6 – уплотнение термопары; 7 – термопара k-типа

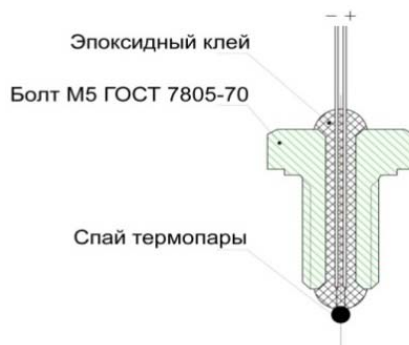


Рис. 2. Термопара температуры рабочего тела и теплоносителя в сборе

Измерительная система построена на базе контроллеров National Instruments NI cDAQ9181 и NI USB 6008. Для считывания и обработки сигналов термопар используются два 16-канальных изотермических модуля ввода NI 9214 совместно с шасси cDAQ9181 с подключением по локальной сети. Для считывания и обработки сигналов датчиков температур и расхода используются блоки NI USB 6008. Фиксация и обработка параметров производится в графической среде разработки LabVIEW *signalexpress for DAQ 2012*. При запуске программы производится считывание конфигурационных файлов, содержащих описание измерительных каналов, и сразу же начинается общий цикл измерений.

Применение автоматизированного измерительного комплекса позволяет проводить испытания теплоэнергетических установок в сжатые сроки с оценкой всех основных термодинамических параметров.

#### Библиографические ссылки

1. Задачи и методы математического моделирования тепловых технических систем / А. В. Делков, Д. А. Непомнящий, Д. Б. Ситничук, А. А. Кишкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 69–70.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. 3-е изд., перераб и доп. М. : Наука, 1970. 940 с.
3. Разработка установок-утилизаторов низкопотенциального тепла на основе органического цикла Ренкина / А. А. Кишкин, Д. В. Черненко, А. В. Делков и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 3 (4). С. 35–36.

4. Очков В. Ф. Теплотехника и теплоэнергетика. М. : МЭИ, 2007. 54 с.

5. Семенов А. Г. Математические модели в инженерной практике : учеб. пособие / Кемеров. технологич. ин-т пищевой промышленности. Кемерово, 2003. 96 с.

#### References

1. Problems and methods of mathematical modeling of thermal technical systems / A. V. Delkov, D. A. Nepomnyashchii, D. B. Sitnichuk, A. A. Kishkin // *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : tezisy Vseros. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoi molodezhi; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk*, 2013. P. 69–70 (In Russ.).
2. Loitsyanskii L. G. *Mekhanikazhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas] 3-e izd., pererab i dop. Moscow, Nauka, 1970. P. 940 (In Russ.).
3. Development of low-potential heat recovery facilities based on the Rankine Organic Cycle / A. A. Kishkin, D. V. Chernenko, A. V. Delkov et al. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2014. № 3 (4). P. 35–36 (In Russ.).
4. Ochkov V. F. *Teplotekhnika i teploenergetika* [Heat engineering and heat power engineering]. Moscow, MEI, 2007. 54 p.
5. Semenov A. G. *Matematicheskie modeli v inzhenernoi praktike* [Mathematical models in engineering practice] : *uchebnoe posobie* / *Kemerovskii tekhnologicheskii institut pishchevoi promyshlennosti. Kemerovo*, 2003. 96 p.

© Ходенков А. А., Ходенкова Э. В., 2019

УДК 536.2.08

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А. А. Ходенков, М. Г. Мелкозеров

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

*Рассматривается вопрос теплотехнических измерений при испытаниях паросиловых энергоустановок. Особое внимание уделяется использованию термопар для измерения температуры потока. Приводится описание системы регистрации сигналов.*

*Ключевые слова: измерения термодинамических параметров, паросиловая установка, измерительный комплекс.*

## EXPERIMENTAL MEASURING COMPLEX FOR TESTS OF POWER PLANTS

A. A. Khodenkov, M. G. Melkozorov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: hodenkov.aa@gmail.com

*This article covered the issue of thermal engineering measurements in the testing of steam power units. Particular attention is paid to the use of thermocouples for measuring the flow temperature. A description of the signal recording system is given.*

*Keywords: thermal engineering measurements, steam power plant, measuring complex.*

**Введение.** Использование паросиловых энергоустановок на низкокипящем рабочем теле позволяет увеличить КПД имеющихся тепловых двигателей или задействовать тепловые источники, недоступные для пароводяных турбин и котлов. А применение данных установок для энергообеспечения космических аппаратов позволит существенно продлить жизненный цикл аппаратов и повысить их надежность.

Перспективными и наиболее распространенными методами трансформации тепловой энергии в механическую и электрическую являются паросиловые циклы на турбомашинах. Такие циклы функционируют по принципу переноса тепла от источника к области теплосброса с выработкой энергии. При низких температурных напорах паросиловой цикл возможно осуществить только с помощью специфических рабочих тел – органических (этанол, фреон, изобутан и т. д.). В зарубежных источниках такие системы получили название установок, реализующих органический цикл Ренкина. [1; 2].

Исследование данной тематики является актуальным и востребованным направлением и в данной работе рассмотрен один из аспектов контроля температуры в экспериментальном контуре паросиловой установки на низкокипящем рабочем теле, принципиальная схема представлена на рис. 1 [3–5].

Устиновка состоит из двух контуров. В первом контуре происходит нагрев рабочего тела с помощью двух электродов 1 и 2, далее нагретая жидкость

попадает в пластинчатый теплообменный аппарат 11, где тепло передается во второй контур, циркуляцию в первом контуре обеспечивает циркуляционный насос 10, контроль параметров: T1 и T2 термопара до и после электродов, T7 и T11 контроль температуры до и после ТА, 8 – регулирующий вентиль, 6 – датчик массового расхода теплоносителя, 13 – ресивер с предохранительным клапаном.

Во втором контуре циркулирует низкокипящее рабочее тело (фреон), из ресивера 19 рабочее тело с помощью насоса 17 поступает в ТА 11, под воздействием подводимого тепла фреон закипает и испаряется, далее газообразный фреон совершает работу на лопатках турбины 4, приводя в движение генератор 3. Охлаждение рабочего тела осуществляется в пластинчатом теплообменном аппарате 9, который омывается холодной водопроводной водой, далее конденсируемое рабочее тело сливается в ресивер. При проведении экспериментального исследования происходит контроль и фиксация температура фреона перед и после каждого участка.

Измерительная система построена на базе контроллеров National Instruments NI cDAQ9181 и NI USB 6008 рис. 2. Считывание и фиксация параметров производится в графической среде разработки LabVIEW signalexpress for DAQ 2012. При запуске программы производится считывание конфигурационных файлов, содержащих описание измерительных каналов, и сразу же начинается общий цикл измерений.



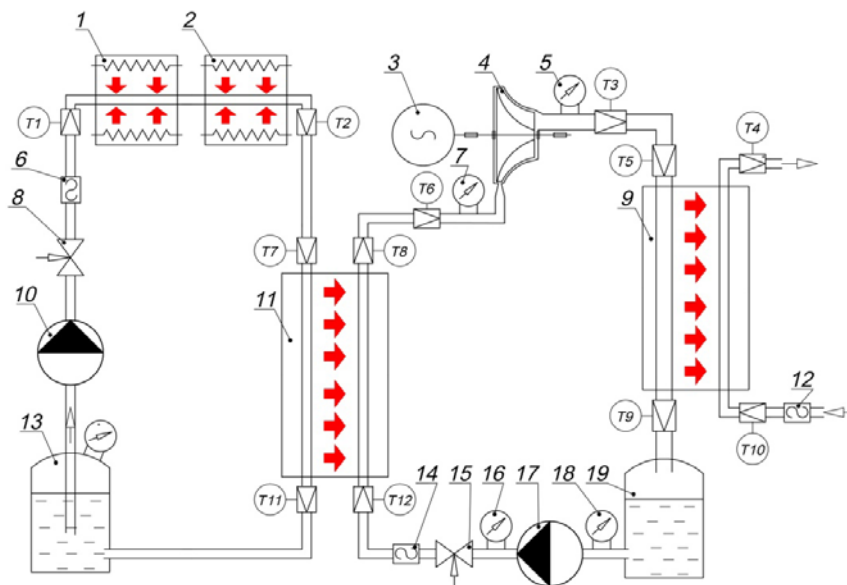


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

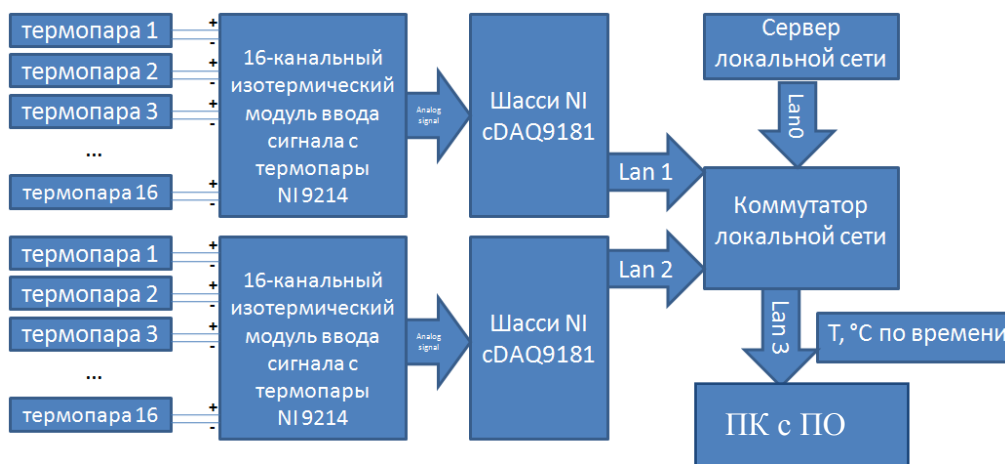


Рис. 2. Автоматизированная система фиксации данных на основе контролеров National Instruments

### Библиографические ссылки

1. Задачи и методы математического моделирования тепловых технических систем / А. В. Делков, Д. А. Непомнящий, Д. Б. Ситничук, А. А. Кишкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: тезисы Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 69–70.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа // 3-е изд., перераб и доп. М. : Наука, 1970. С. 940.
3. Разработка установок-утилизаторов низкпотенциального тепла на основе органического цикла Ренкина / А. А. Кишкин, Д. В. Черненко и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 3 (4). С. 35–36.
4. Очков В. Ф. Теплотехника и теплоэнергетика. М. : МЭИ, 2007. С. 54.
5. Семенов А. Г. Математические модели в инженерной практике : учеб. пособие / Кемеров. технологич. ин-т пищевой промышленности. Кемерово. 2003. С. 96.

### References

3. Zadachi i metody matematicheskogo modelirovaniya teplovykh tekhnicheskikh sistem / A. V. Delkov, D. A. Nepomnyashchii, D. B. Sitnichuk, A. A. Kishkin // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : tezisy Vseros. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoi molodezhi / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013. P. 69–70.
4. Loitsyanskii L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. 3-e izd., pererab i dop. Moscow, Nauka, 1970. P. 940.
3. Razrabotka ustanovok-utilizatorov nizkopotsial'nogo tepla na osnove organicheskogo tsikla Renkina / A. A. Kishkin, D. V. Chernenko et al. // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2014. № 3 (4). P. 35–36.
4. Ochkov V. F. Teplotekhnika i teploenergetika. Moscow, MEI, 2007. P. 54.
5. Semenov A. G. *Matematicheskie modeli v inzhenernoi praktike* [Mathematical models in engineering practice] : uchebnoe posobie / Kemerovskii tekhnologicheskii institut pishchevoi promyshlennosti. Kemerovo, 2003. 96 p.

© Ходенков А. А., Мелкозеров М. Г., 2019

УДК 661.935

## БЛОК ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНДЕНСАТОРА-ИСПАРИТЕЛЯ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В. В. Черненко, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 2887722@mail.ru

*Рассмотрен гидравлический расчет, входящий в состав математической модели конденсатора-испарителя криогенных установок извлечения кислорода, основанный на решении многошаговым (итерационным) методом уравнения гидродинамического баланса контура с естественной циркуляцией.*

*Ключевые слова: конденсатор-испаритель, математическая модель, гидродинамический расчет, итерационный метод.*

## HYDRAULIC CALCULATION UNIT IN THE MATHEMATICAL MODEL OF AIR SEPARATION PLANT EVAPORATOR-CONDENSER

V. V. Chernenko, D. V. Chernenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2887722@mail.ru

*The hydraulic calculation, which is part of a mathematical model of a condenser-evaporator of a cryogenic oxygen recovery plants, based on the multi-step (iterative) method of equation of the hydrodynamic balance of a circuit with natural circulation.*

*Keywords: evaporator-condenser, mathematical model, hydrodynamic calculation, iterative method.*

Приближенный расчет конденсатора-испарителя может быть выполнен по методике, исключающей необходимость определения скорости циркуляции  $w_0$ . Для этого используется графоаналитическое решение задачи теплообмена на базе трех уравнений, отвечающих процессам переноса теплоты от конденсирующейся среды к внешней поверхности трубы, через стенку трубы заданной толщины и от внутренней поверхности трубы к кипящей жидкости. Однако использование уравнений, определяющих скорость циркуляции в контуре естественной конвекции, позволяет получить более строгое решение поставленной задачи.

Скорость циркуляции при стационарности процесса определяется из условия динамического равновесия движущего напора и суммы гидравлических сопротивлений подъемной и опускной ветвей контура

$$\Delta p_{\text{дв}} = \Delta p_{\text{под}} + \Delta p_{\text{оп}} \quad (1)$$

Движущий напор циркуляции можно записать в виде

$$\Delta p_{\text{дв}} = g \left[ \rho' (H - l_{\text{эк}}) + \bar{\varphi} (\rho' - \rho'') (l_{\text{р}} - l_{\text{эк}}) \right], \quad (2)$$

где  $\rho'$  – плотность жидкости в опускной системе;  $\rho''$  – плотность пара при среднем давлении в трубе;  $\bar{\varphi}$  – среднее по длине участка кипения истинное объемное паросодержание;  $H = l_{\text{оп}} - l + l_{\text{р}}$ ,  $l$  – длина тру-

бы;  $l_{\text{р}}$  – длина рабочей части;  $l_{\text{эк}}$  – длина экономайзерной зоны;  $l_{\text{оп}}$  – длина опускной части.

Истинное объемное паросодержание двухфазного потока в вертикальных каналах связано со скоростью циркуляции соотношением

$$\varphi = \frac{w_0''}{w_0'' + w_0} \left( 1 + \frac{w^*}{\frac{w_0''}{2} + w_0} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $w^*$  – относительная скорость всплытия паровых снарядов;  $w_0''$  – приведенная скорость пара на выходе из трубы.

Гидравлическое сопротивление движению среды в подъемной части контура циркуляции определяется как сумма сопротивлений участков, составляющих подъемную часть

$$\Delta p_{\text{под}} = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{эк}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{уск}} + \Delta p_{\text{вых}}, \quad (4)$$

каждое из которых также связано со скоростью циркуляции.

Потери давления в опускной части контура  $\Delta p_{\text{оп}}$  определяются скоростью опускного движения жидкости, величина которой не должна превышать скорости всплытия пузырей пара, образующихся при обогреве стенок опускной трубы.

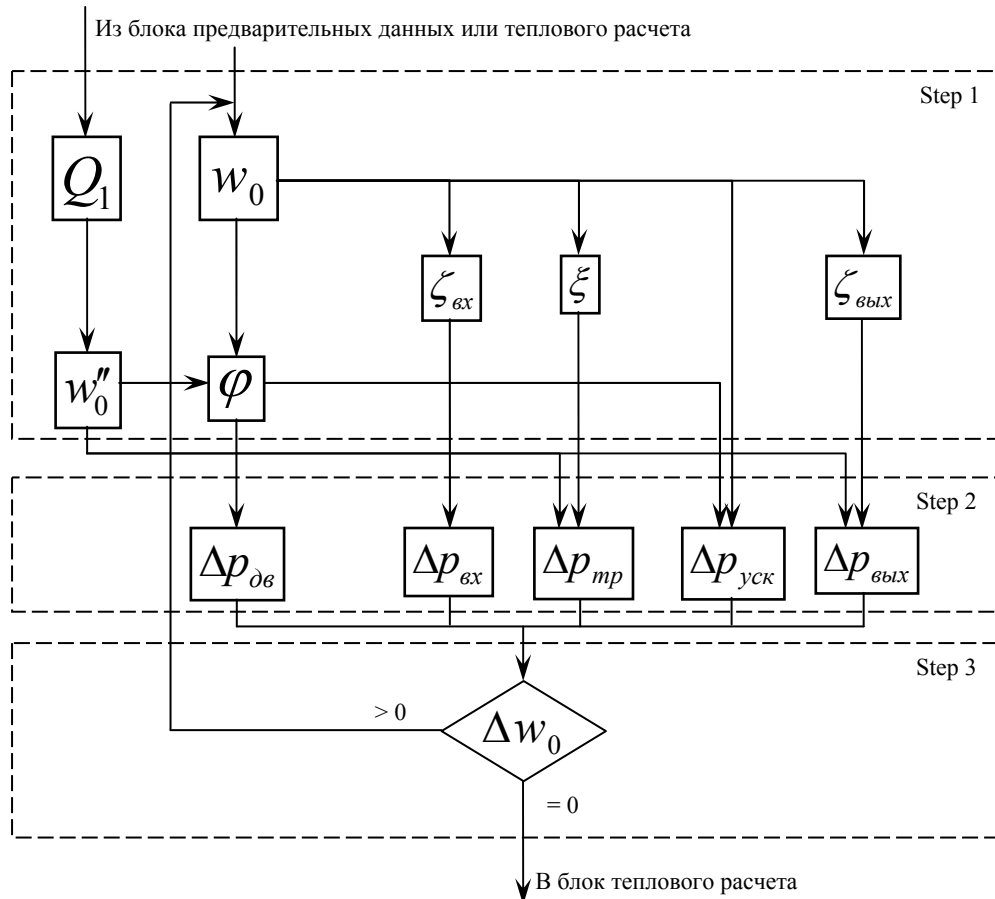


Схема расчетной последовательности гидравлического блока

При выполнении этого условия гидравлическое сопротивление опускной системы не превышает 1 % сопротивления подъемного контура, следовательно, в выражении (1) можно полагать  $\Delta p_{\text{оп}} = 0$  [2; 3].

Таким образом, после преобразования уравнение (1) приобретает вид

$$g \left[ \rho' (H - l_{\text{эк}}) + \bar{\varphi} (\rho' - \rho'') (l_{\text{п}} - l_{\text{эк}}) \right] = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{уск}} + \Delta p_{\text{вых}} \quad (5)$$

Расчет ведется многошаговым (итерационным) методом с уточнением величины скорости циркуляции и включает в себя три шага (см. рисунок).

На первом шаге определяются теплофизические и гидравлические величины, участвующие в уравнении (5). Для старта расчета необходимо задаться предварительным значением скорости циркуляции  $w_0$ , которую для сокращения числа итераций можно приближенно определить по графикам [4]. Далее для выбранной скорости определяем значения коэффициентов сопротивления по данным [5].

На втором шаге определяются все составляющие уравнения (5) и оценивается близость к балансу его левой и правой частей.

На третьем шаге выбирается приращение (относительно предыдущего значения) скорости циркуляции и выполняется переход к первому шагу.

Итерации выполняются до достижения заданного уровня сходимости уравнения.

По завершении цикла итераций результаты передаются в модуль теплового расчета. Результаты расчета теплового модуля, в свою очередь, используются для уточнения входных параметров гидравлического модуля.

#### Библиографические ссылки

1. Черненко Д. В., Черненко В. В. Математическая модель конденсатора-испарителя воздухоразделительной установки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : докл. II Междунар. научно-практ. конф., посвященной дню космонавтики / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Т. 1. С. 235–237.
2. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники. М. : Энергоиздат, 1982. 312 с.
3. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М. : Высшая школа, 1977. 352 с.
4. Елифанова В. И., Аксельрод Л. С. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. М. : Машиностроение, 1973. Т. 1. 472 с.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. : Машиностроение, 1975. 556 с.

### References

1. Chernenko D. V., Chernenko V. V. *Matematicheskaya model' kondensatora-isparatelya vozdukhorazdelitel'noy ustanovki* [Mathematical model of air separation plant evaporator-condenser] // *Actual problems of aviation and astronautics: Proc. of the II International. scientific-practical Conf., dedicated to the Day of Cosmonautics*. 2016. № 1. P. 235–237.
2. Grigoriev V. A., Krokhin Yu. I. *Teplo- i massoobmennyye apparaty kriogennoy tekhniki* [Heat and mass transfer devices of cryogenic equipment]. Moscow, Energoizdat, 1982. 312 p.
3. Kutepov A. M., Sterman L. S., Styushin N. G. *Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii* [Hydrodynamics and heat transfer during vaporization]. Moscow, Vysshaya shkola, 1977. 352 p.
4. Epifanova V. I., Axelrod L. S. *Razdeleniye vozdukhа metodom glubokogo okhlazhdeniya* [Air separation by deep cooling]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1973. Vol. 1. 472 p.
5. Idelchik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1975. 556 p.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., 2019

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МИКРОТУРБИНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин, А. В. Делков, М. О. Шилкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*Рассматривается постановка задачи и результаты экспериментального исследования эффективности работы микротурбинных энергетических установок. Приведены экспериментальные данные по полезной мощности и КПД установок. Проанализированы перспективы использования установок в распределенной энергетике.*

*Ключевые слова: микротурбинная установка, угловая скорость, тепловые источники, энтальпия рабочего тела, рабочее колесо, мощность турбины.*

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF WORK OF MICROTURBINE POWER UNITS

Yu. N. Shevchenko, A. A. Kishkin, A. V. Delkov, M. O. Shilkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*This article considers the statement of the problem and the results of an experimental research of the efficiency of microturbine power units. Experimental data on the net power and efficiency of the units are presented. The prospects of using units in distributed energy are analyzed.*

*Keywords: microturbine installation, angular velocity, heat sources, enthalpy of the working fluid, impeller, turbine power.*

Применение микротурбинных установок в системах электрогенерации в настоящее время является актуальным направлением развития энергетики [1]. Микротурбинные установки компактны, обладают высокой степенью эффективности и возможностью использования тепловых источников различных параметров, что делает возможным реализацию на их основе системы распределенного энергоснабжения для частных хозяйств и малых предприятий [2].

В рамках настоящего исследования были проведены экспериментальные исследования эффективности работы микротурбинных энергетических установок. Целью работ является совершенствование конструкции энергетической установки на основе теоретических и экспериментальных исследований для получения максимально возможного коэффициента преобразования энергии за счет вариативной оптимизации проточной части турбины, оптимизации граничных условий на входе и выходе микротурбины по режимным параметрам: энтальпии рабочего тела и угловой скорости вращения ротора [3].

Для получения экспериментальных характеристик энергетической установки, подтверждения данных теоретических исследований и проведения

верификации расчетного алгоритма были произведены испытания физического макета энергетической установки, конструкция которого была представлена в работе [4].

Экспериментальные исследования проводились в несколько серий при варьировании типов рабочих колес, направляющих аппаратов, уровней нагрузки генератора. Для обработки результатов экспериментальных исследований использовались соотношения, представленные ранее в работе [5]. Обработка прошла в три стадии: обработка результатов измерений в сечении; обработка результатов на участках; вычисление энергетических характеристик ступени.

Диаметр рабочего колеса в экспериментах варьировался от 48 до 100 мм. Конструкция микротурбинного колеса диаметром 48 мм и экспериментальная сборка стенда представлены на рис. 1.

При проведении экспериментальных исследований было установлено, что показатели полезной мощности турбины зависят главным образом от величины нагрузки генератора и угловой скорости турбины. На рис. 2 приведен график зависимости полезной мощности турбины от скорости вращения для различных уровней нагрузки генератора.

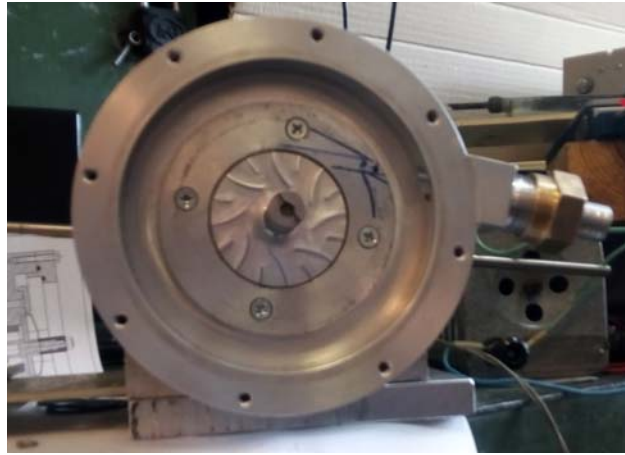
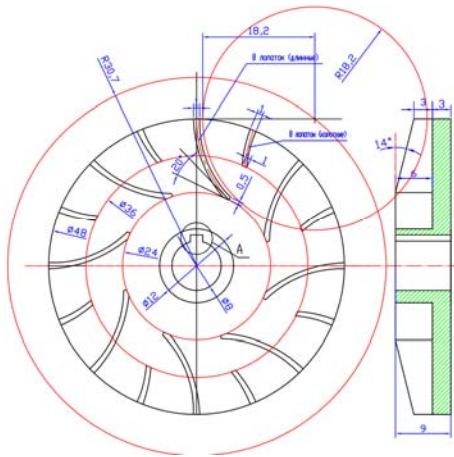


Рис. 1. Конструкция радиального колеса турбины и сборка экспериментального стенда

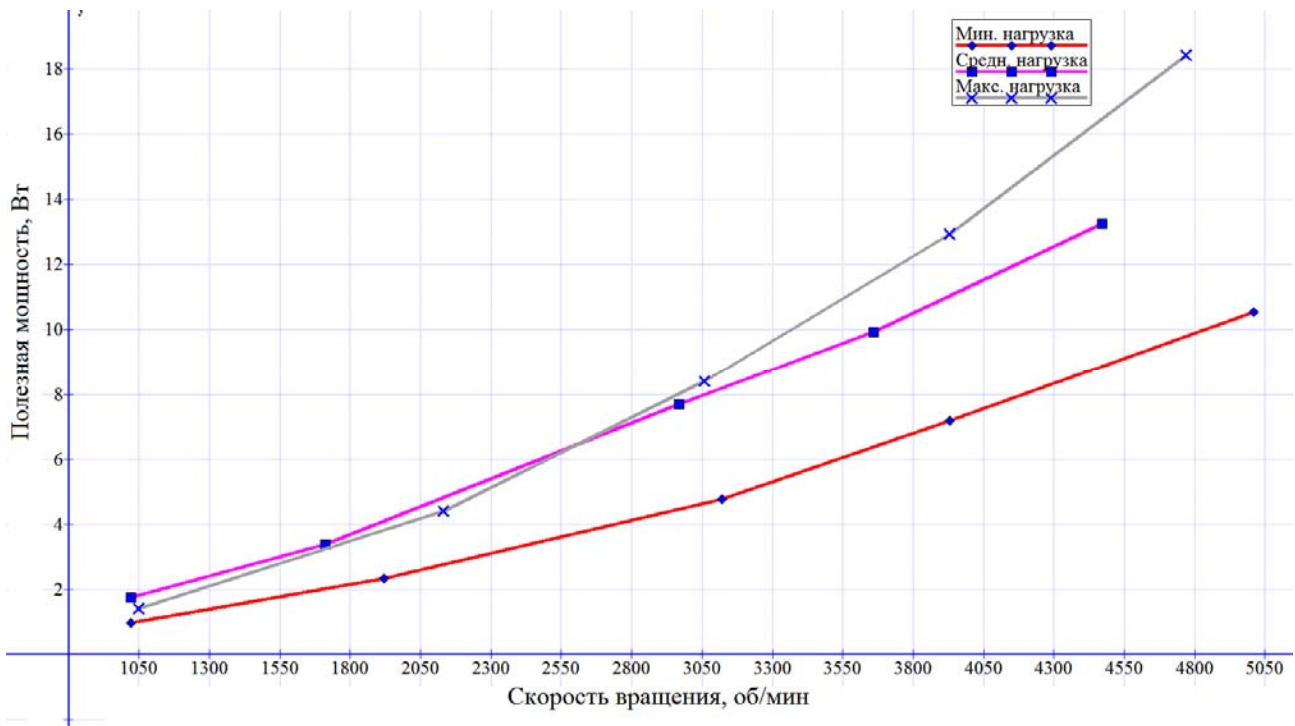


Рис. 2. Зависимость полезной мощности турбины от скорости вращения для различных уровней нагрузки генератора

По данным (рис. 2) видно, что максимальное значение полезной мощности турбины наблюдается при полной нагрузке генератора и составляет 18,3 Вт при угловой скорости вращения 4780 об/мин. При этом максимальное значение КПД в ходе экспериментальных исследований колеса диаметром 48 мм составило 3,5 %. Для повышения КПД необходима разработка мероприятий по снижению отдельных видов потерь в турбинной ступени, значительную долю которых составляют потери с выходной скоростью.

Дальнейшее направление исследований в рамках выбранной тематики будет предполагать исследование конструктивных особенностей подводных устройств и проточной части с целью повышения КПД и конструктивной оптимизации микротурбинного узла.

#### Библиографические ссылки

1. Чухин И. М. Техническая термодинамика. Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т им. В. И. Ленина, 2006. 224 с.
2. Васильев В. К., Васильева Е. В. Проектирование проточных частей судовых турбин Л. : Судостроение, 1966. 263 с.
3. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1977. 540 с.
4. Исследование работы канальных подводных устройств микротурбин / Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин, А. В. Делков и др. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. мат. риллов XIV Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред.

Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 237–239.

5. Моделирование проточной части центробежных турбин различной степени реактивности / А. А. Кишкин, Ю. Н. Шевченко, М. М. Попугаев и др. // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 243–244.

### References

1. Chukhin I. M. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Ivanovo : Ivan. state. Energetics University, 2006. 224 p. (In Russ.)

2. Vasilyev V. K., Vasilyeva E. V. *Proektirovanie protochnykh chastej sudovykh turbin* [Designing of flowing parts of ship turbines]. Leningrad : Sudostroenie Publ., 1966. 263 p. (In Russ.)

3. Ovsyannikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh*

*dvigatelej* [Theory and calculation of power units for liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 540 p. (In Russ.)

4. [The study of the operation of channel supply devices of microturbines] / Yu. N. Shevchenko, A. A. Kishkin, A. V. Delkov et al. // *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики: sb. materialov XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of aviation and cosmonautics: materials XIV Int. scientific-practical conf.]. Krasnoyarsk, 2018 . P. 237–239.

5. [Modeling the flow of centripetal turbines with difference degree of reactivity] / A. A. Kishkin, Yu. N. Shevchenko, M. M. Popugaev et al. // *Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf.* [Materials XXII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2018. P. 243–244.

© Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Делков А. В., Шилкина М. О., 2019

УДК 629.78

## К ВОПРОСУ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРОВЫХ МИКРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин, А. В. Делков, М. О. Шилкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*Рассматриваются основные проблемы, связанные с численным моделированием паровых микротурбинных установок. Оцениваются основные особенности рабочих процессов и связанные с этим сложности вычислений. Анализируются перспективы использования аппарата численного моделирования для оптимизации конструкции микротурбин.*

*Ключевые слова: численное моделирование, паротурбинная установка, микротурбина.*

## NUMERICAL SIMULATION OF STEAM MICROTURBINE UNITS

Yu. N. Shevchenko, A. A. Kishkin, A. V. Delkov, M. O. Shilkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gift\_23j@mail.ru

*The main problems associated with the numerical simulation of steam microturbine plants are considered. The main features of work processes and the associated complexity of computing are evaluated. The prospects of using a numerical simulation apparatus to optimize the design of microturbines are analyzed.*

*Keywords: numerical simulation, steam turbine installation, microturbine.*

Малорасходные паровые турбины находят свое применение в малой распределенной энергетике в составе установок для преобразования низкопотенциальной тепловой энергии, работающих на основе органического цикла Ренкина [1]. Ключевой особенностью данных турбин являются низкие уровни мощности, что определяет специфические особенности их рабочих процессов, которые в настоящее время остаются малоизученными. Вопросы разработки методов расчета и проектирования турбин данного типа являются актуальными и представляют собой самостоятельный научный интерес.

Численное моделирование рабочих процессов в турбомашине в настоящее время является приоритетным направлением исследования в связи с ростом вычислительных мощностей и развитием программно-алгоритмического обеспечения [2]. С целью повышения точности вычислений разрабатываются математические модели рабочих процессов в турбомашине с учетом характерных особенностей: нестационарности процесса, наличием срывов потока, образованием вихрей и т. д.

Для возможности численного решения большое значение имеет используемая математическая модель. Наиболее часто реализуются одномерные модели течения для элементарной струйки (движение в межлопаточном канале), которые замыкаются на целую решетку по условиям симметричности. Сложнее обстоит дело с целыми решетками в случае наличия парциальности или иных особенностей течения [3]. Для

этих задач обычно затрачивается значительное машинное время. Поэтому такие исследования не получили широкого распространения.

В области исследования паровых микротурбин достоверные модели в настоящее время отсутствуют, что обусловлено спецификой их рабочих процессов. Низкий расход рабочего тела приводит к необходимости введения парциального впуска и снижению высот и проходных сечений подводящего устройства и рабочего колеса, что вызывает снижение КПД. Низкие значения энтальпии на входе в турбину приводят к необходимости реализации расширения в области влажного пара с частичной конденсацией рабочего тела.

Вследствие наличия парциальности имеет место наличие неравномерности потока в рабочем колесе. Особую роль в процессе течения рабочего тела в проточных частях малорасходных турбомашин играет нестационарный процесс взаимодействия неподвижного подводящего устройства и вращающейся рабочей решетки [4].

Возможности детального численного изучения сложных физических явлений, происходящих в проточной части малорасходных паровых турбомашин, существенно ограничены из-за отсутствия достоверных и верифицированных математических моделей протекающих в них физических процессов.

Аналитическое описание пространственной структуры потока в малорасходных турбомашине – сложная и трудоемкая задача.



Основными методами исследований турбомашин данного класса являются физические эксперименты с получением интегральных оценок основных показателей эффективности [5]. С использованием данных физического эксперимента возможно создать математическую модель рабочего процесса в малорасходной паровой турбине с учетом всех специфических особенностей.

Анализ и обработка данных физического и математического позволят создать новые эффективные методики оптимального проектирования малорасходных проточных частей и профилирования подводящих устройств.

### References

1. Denton J. D. Some limitations of turbomachinery CFD. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010: Power

for Land, Sea and Air. June 14-18, 2010, Glasgow, UK. P. 735–745. DOI: 10.1115/GT2010-22540.

2. Numerical study of the dehumidification structure optimization based on the modified model / G. Zhang, F. Wang, D. Wang et al. // Energy Conversion and Management. # 181. 2019. P. 159–177.

3. Schobeiri M. T. Turbomachinery flow physics and dynamic performance. Springer. 2012. 725 p.

4. Dixon S. L., Hall C. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. Butterworth-Heinemann, Elsevier. 2014. 537 p.

5. Chen N. Aerothermodynamics of turbomachinery: analysis and design. John Wiley & Sons. 2010. 461 p.

© Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А.,  
Делков А. В., Шилкина М. О., 2019



**Секция**

**«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»**

УДК 621.9.025

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНОГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕСС-ФОРМ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В. А. Вавилин\*, В. А. Левко, И. О. Якубович, М. С. Покушко, А. А. Кульков\*\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: Vavilin.vladimir@mail.ru

АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

\*\*E-mail: cypress12@mail.ru

*Рассмотрены особенности технологии изготовления специального осевого инструмента малого диаметра из твердосплавных материалов. Отработаны режимы резания при изготовлении инструмента для обработки точных отверстий малого диаметра в изделиях после термической обработки.*

*Ключевые слова: осевой инструмент малого диаметра, специальный инструмент, технология изготовления, обработка отверстий.*

## THE DESIGN AND MANUFACTURE OF SPECIAL AXIAL TOOL FOR MAKING MOLDS OF A COMPLEX CONFIGURATION

V. A. Vavilin, V. A. Levko, I. O. Yakubovich, M. S. Pokushko, A. A. Kulkov\*\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

\*E-mail: Vavilin.vladimir@mail.ru

JSC «Krasnoyarsk Machine Building Plant»

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

\*\*E-mail: cypress12@mail.ru

*The features of the technology of manufacturing a special axial tool of small diameter of carbide materials. Worked out cutting conditions in the manufacture of tools for machining precise holes of small diameter in the products after heat treatment.*

*Keywords: axial tool of small diameter, special tool, manufacturing technology, hole machining.*

Одной из существенных проблем в современном производстве является обработка сложных фасонных поверхностей при изготовлении пресс-форм и особо точных отверстий малых диаметров в заготовках после термической обработки. Это вызывает необходимость применения малоразмерного специального осевого инструмента из твердосплавных материалов и отработки технологии его изготовления.

В процессе выполнения НИР на оборудовании НОЦ «РКТ» СибГУ им. М. Ф. Решетнева была поставлена задача по изготовлению формообразующих поверхностей штырьковых пресс-форм для нужд базового предприятия. Главным технологическим вопросом являлось получение 114 отверстий Ø1,29H7 мм в заготовках из стали 40X, закаленных до твердости 35...40 HRC.

В ходе эксперимента по отработке технологии изготовления пресс-форм на образце-свидетеле из той же стали и твердости мы столкнулись с несколькими проблемами, а именно:

- поломка инструмента через каждые 3 отверстия;
- вынимание лома инструмента из отверстий;

- недостаточная точность отверстий;
- большое биение при закреплении инструмента.

Для их устранения были отработаны режимы резания, минимизировано биение за счет использования гидро-зажимных патронов, использование эрозионных станков для исправления брака деталей. Также была определена марка твердого сплава для изготовления осевого инструмента с целью последующего его использования для получения высокоточных отверстий малого диаметра. С учетом рекомендаций [2], для формообразования отверстий Ø1,29H7 было принято решение использовать следующие типы инструментов:

- сверло Ø1,12 мм, угол при вершине 135°;
- сверло Ø1,23 мм, угол при вершине 90°;
- зенкер Ø1,26 мм;
- развертка Ø1,29H7 мм.

Для изготовления данного набора инструментов в качестве основного инструментального материала определён калиброванный прутки из твердого сплава марки ВК8. В качестве основного оборудования для изготовления осевого инструмента применяли шлифовальный станок с ЧПУ.

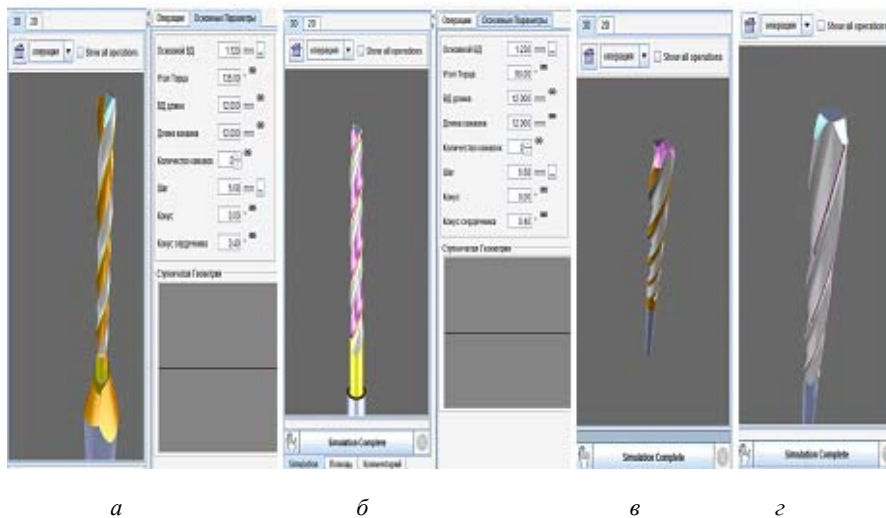


Рис. 1. 3D-модель осевого инструмента малого диаметра:  
 а – сверло Ø1,12 мм; б – Ø1,23 мм; в – зенкер Ø1,26 мм; з – развертка Ø1,29Н7

**Режимы резания при изготовлении развертки Ø1,29Н7**

Операции обработки	Подача (F мм/мин)	Шлифовальные круги (алмазные)	Режимы заточки		
			Окружная скорость	Частота вращения	Скорость резания
1. Круглая шлифовка	F = 1 мм/мин.	1А1 (D = 50 мм B = 5 мм)	V <sub>к</sub> = 19 м/с	S = 3800 об/мин	V = 596,6 м/мин
2. Канавка из целого	F = 140 мм/мин.		V <sub>к</sub> = 20 м/с	S = 5200 об/мин	V = 612,3 м/мин
3. Вд финиш	F = 220 мм/мин.	1А1 (D = 50 мм, B = 5 мм)	V <sub>к</sub> = 20 м/с	S = 5200 об/мин	V = 612,3 м/мин
4. Фаска	F = 200 мм/мин.	11V9 (D = 50 мм, B = 30 мм)			

Процесс проектирования специального осевого инструмента на данном станке осуществляется в режиме диалога и заключается в создании его 3D-модели. На первом этапе осуществляется ввод основных параметров: диаметра инструмента, числа зубьев, задается форма торцевой части, число канавок и угол конуса, а также материал режущего инструмента. На втором этапе задается геометрия угловых параметров: передний ( $\gamma$ ) и задний ( $\alpha$ ) углы, угол подъема винтовой канавки  $\omega$ , радиус закругления  $r$ , ширина ленточки  $f$ , угол при вершине и другие параметры. Указывается технология – изготовление или переточка. На основании введенных параметров программа предлагает последовательность операций: оцифровка, обработка канавки из целого образца, окончательная обработка внешнего диаметра, формирование подточки на торце и финишную обработку торца. При задании угловых параметров учитывались рекомендации по определению геометрии инструмента [3].

На рис. 1 показаны 3D-модели осевого инструмента малого диаметра.

Последовательность и режимы изготовления развертки Ø1,29Н7 представлены в таблице.

На площадке НОЦ «РКТ» СибГУ им. М. Ф. Решетнева при обработке товарных изделий пресс-форм были проведены производственные испытания спроектированных и изготовленных режущих инструмен-

тов (рис. 1). В качестве основного оборудования использовали фрезерные станки с ЧПУ. Образец готового изделия приведен на рис. 2. Количество обработанных отверстий в некоторых образцах составляло 114 штук, что показывает высокую стойкость инструмента при обработке материалов после их термической обработки.



Рис. 2. Готовые отверстия диаметром Ø1,29Н7 в пресс-форме

Таким образом, на основании выполненных работ можно сделать следующие выводы:

– предлагаемую технологию изготовления специального осевого инструмента малого диаметра следу-

ет использовать в производственных условиях при обработке точных отверстий, заданных по шестому или седьмому квалитетам;

– процесс обработки желательно выполнять с применением смазывающе-охлаждающей жидкости и специальных циклов глубокого сверления.

#### Библиографические ссылки

1. Пресс-формы [Электронный ресурс]. URL: <https://promzn.ru/stanki-i-oborudovanie/press-forma-dlya-litya-plastmass.html> (дата обращения: 25.03.2019).

2. Схиртладзе А. Г. Технология производства режущего инструмента : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 2010. 334 с.

3. Справочник конструктора-инструментальщика / под общ. ред. В. А. Гречишникова и С. В. Кирсанова.

2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2006. 542 с.

#### References

1. Molds [Electronic resource]. URL: <https://promzn.ru/stanki-i-oborudovanie/press-forma-dlya-litya-plastmass.html> (accessed: 25.03.2019).

2. Schirtladze A. G. Production technology of cutting tool : textbook. allowance. Moscow, Higher. school, 2010. 334 p.

3. Reference designer-toolmaker / under total. ed. V. A. Grechishnikova, S. V. Kirsanova. 2nd ed. reslave. and add. Moscow, Mechanical Engineering, 2006. 542 p.

© Вавилин В. А., Левко В. А., Якубович И. О., Покушко М. С., Кульков А. А., 2019

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОРЕБРЕННОЙ СТЕНКИ ТЕПЛООБМЕННИКА\*

Е. Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Проведены расчеты локального коэффициента теплоотдачи теплоносителя ЛЗ-ТК-2 и приведенного коэффициента теплопередачи оребренной стенки теплообменника.*

*Ключевые слова: коэффициент теплопередачи, оребренная стенка, теплообменник, теплоноситель ЛЗ-ТК-2.*

## CALCULATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF FINNED WALL OF HEAT EXCHANGER

E. N. Vasil'ev

Institute of Computational Modelling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
 E-mail: ven@icm.krasn.ru

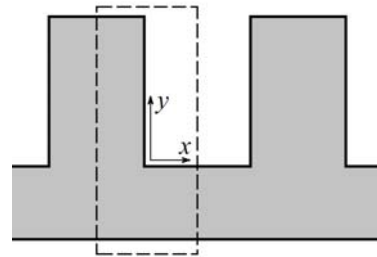
*The local heat transfer coefficient of the LZ-TK-2 coolant and average heat transfer coefficient of the finned wall of the heat exchanger were calculated.*

*Keywords: heat transfer coefficient, finned wall, heat exchanger, heat transfer medium LZ-TK-2.*

Одной из важнейших технических систем космических аппаратов является система терморегулирования, обеспечивающая оптимальные температурные режимы работы всех блоков и узлов в реальных условиях эксплуатации в космическом пространстве [1–3]. В системах терморегулирования передача теплоты от приборно-агрегатного оборудования к устройствам сброса тепла (радиаторам) в окружающее пространство осуществляется теплоносителями, циркулирующими через теплообменные устройства внутренних и наружных гидравлических контуров. Оптимизация конструкции теплообменников позволяет повысить эффективность работы системы терморегулирования в целом. Целью работы является расчет характеристик теплопередачи ребристой теплообменника.

Рассмотрим процесс теплообмена теплоносителя ЛЗ-ТК-2 с оребренной стенкой, поперечное сечение которой приведено на рисунке. Характеристики теплообмена зависят, с одной стороны, от коэффициента теплоотдачи теплоносителя на поверхности теплообменника, с другой стороны, от условий теплопередачи в объеме стенки механизмом теплопроводности. Расчет коэффициента теплоотдачи проводился с учетом режима движения и физических свойств теплоносителя, геометрических параметров оребренной поверхности. По характеру движения в зависимости от значения числа Рейнольдса  $Re = uD/\nu$

различают устойчивый ламинарный режим ( $Re < 2 \cdot 10^3$ ), переходной ( $2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$ ) и развитый турбулентный ( $Re > 10^4$ ).



Оребренная поверхность теплообменника

Для канала прямоугольного сечения, имеющего высоту  $a$  и ширину (расстояние между ребрами)  $b$ , в качестве характерного размера принята величина эквивалентного гидравлического диаметра  $D = 2ab / (a + b)$ . Величина локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  на границе «теплоноситель-поверхность теплообменника» определяется с помощью критериальных уравнений, которые базируются на результатах опытных исследований и теории подобия [4]. Для развитого турбулентного режима использовано уравнение

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_{с})^{0,25}.$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 18-41-242005.

Число Прандтля  $Pr = \nu c_p / \lambda$  определялось по значениям коэффициента вязкости  $\nu$ , теплоемкости  $c$ , плотности  $\rho$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , соответствующим средней температуре жидкости ( $Pr_j$ ) и температуре поверхности стенки ( $Pr_c$ ). Температурные зависимости физических свойств теплоносителя ЛЗ-ТК-2 приведены в [5]. Величина локального коэффициента теплоотдачи ЛЗ-ТК-2 определялась по формуле

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{D}.$$

По результатам расчета для  $a = 2,5$  мм,  $b = 1,3$  мм, скорости  $u = 2,9$  м/с, кинематической вязкости  $\nu = 0,45$  мм<sup>2</sup>/с и  $\lambda = 0,15$  Вт/(м·К) получены значения  $Re = 1,1 \cdot 10^4$  и  $\alpha = 5,7 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для расчета коэффициента теплопередачи сначала определялось температурное поле в стенке теплообменника на основе решения стационарной задачи теплопроводности. В случае толстого ребра, в котором градиенты температуры сопоставимы по ширине и высоте, численно решалось двумерное уравнение теплопроводности вида

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0,$$

расчетная область задачи, которая представляет собой половину периодически повторяющегося фрагмента ребренной стенки, выделена на рис. 1 штриховым контуром. При этом на границах в объеме стенки задавались условия симметрии по тепловому потоку  $\partial q / \partial x = 0$ , а на поверхностях контакта с теплоносителем – граничные условия третьего рода

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{l=0,L} = q|_{l=0,L},$$

здесь  $T$  – температура;  $x, y$  – пространственные координаты;  $l = x, y$  и  $L$  – размер, соответствующий этим координатам. Для тонкого ребра с малыми температурными градиентами по ширине достаточно использования одномерного уравнения теплопроводности. По рассчитанному распределению температуры ребренной поверхности и величине локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  вычислялась суммарная величина теплового потока, с учетом которой далее определялся коэффициент теплопередачи ребристого теплообменника, приведенный к единице площади его основания.

Таким образом, в работе представлен алгоритм расчета, который позволяет определять характеристики теплопередачи при различных параметрах ребренной стенки и тем самым проводить оптимизацию

теплообменника, направленную на повышение эффективности его работы.

### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
2. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко, В. Е. Косенко и др. // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, вып. 6. С. 19–28.
3. Васильев Е. Н., Дектерев А. А. Математическое моделирование процессов теплообмена в двухфазном контуре терморегулирования с капиллярным насосом // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 4 (21). С. 12–16.
4. Морковин А. В., Плотников А. Д., Борисенко Т. Б. Теплоносители для тепловых труб и наружных гидравлических контуров систем терморегулирования автоматических и пилотируемых космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2015. № 3. С. 89–99.
5. Карминский В. Д. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Маршрут, 224 с.

### References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* (Foundation of information satellites design). Siberian State Aerospace University. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.
2. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., Kosenko V. E. et al. [Computational modeling of heat exchange in thermoregulation systems of space vehicle]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2009. Vol. 14, № 6. P. 19–28. (In Russ.)
3. Vasil'ev E. N., Dekterev A. A. [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in the two-phase thermal control loop with the capillary pump]. *Vestnik SibGAU*. 2008. № 4 (21). P. 12–16. (In Russ.)
4. Morkovin A. V., Plotnikov A. D., Borisenko T. B. [Heat transfer medium for heat pipes and external hydraulic circuits of thermal control systems of unmanned and manned spacecraft]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2015. № 3. P. 89–99. (In Russ.)
5. Karminsky V. D. *Tekhnicheskaya termodinamika* (Technical thermodynamics and heat transfer). Moscow, Marshrout Publ., 224 p.

© Васильев Е. Н., 2019

УДК 536.248.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ\*

Е. Н. Васильев\*, В. А. Дервянко, М. И. Корхова

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Проведено экспериментальное исследование теплофизических процессов в секции теплового аккумулятора с фазовым переходом «твердое тело – жидкость» для системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры.*

*Ключевые слова: тепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий материал, гипертеплопроводящая пластина, тепловой режим, космический аппарат.*

## AN EXPERIMENTAL MODEL OF THERMAL STORAGE WITH PHASE TRANSFORMATION

E. N. Vasil'ev\*, V. A. Derevyanko, M. I. Korkhova

Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: ven@icm.krasn.ru

*An experimental study of thermophysical processes in the section of a heat storage with a “solid-liquid” phase change for the thermal control system of onboard electronic equipment has been conducted.*

*Keywords: thermal storage, thermal storage material, hyperheat-conducting plate, thermal regime, spacecraft.*

В работах [1–4] предложен тепловой аккумулятор (ТА) и проведено вычислительное моделирование его работы в системе терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с пиковым периодическим тепловыделением. ТА позволяет перераспределить теплоту, выделяемую во время пиковых нагрузок, на более длительный период за счет чередующихся процессов плавления-затвердевания теплоаккумулирующего материала (ТАМ) и снизить массу и габариты радиатора, рассеивающего теплоту в космическое пространство. Конструкция предложенного ТА состоит из однотипных секций, разделенных гипертеплопроводящими (ГТП) пластинами. ГТП пластины значительно повышают эффективность теплообмена с ТАМ по всей поверхности контакта, по своей сути они являются плоскими тепловыми трубами, в которых высокая теплопередающая способность обеспечивается за счет движения и фазовых превращений теплоносителя в пористой среде [5].

Для натуральных исследований динамики фазовых превращений ТАМ была создана экспериментальная модель секции ТА, изображение которой приведено на рис. 1. В конструкции секции использованы в качестве боковых стенок две никелевые ГТП пластины,

которые установлены в пазы верхнего и нижнего оснований, изготовленных из оргстекла, торцевые стенки также выполнены из оргстекла. ГТП пластины имеют длину 320 мм, ширину 78 мм и толщину 2,5 мм. Теплота подводится со стороны нагревателей, а отводится медными жидкостными теплообменниками, которые охлаждаются теплоносителем, поступающим из термостата. Рабочий объем ТА соединен гибкой трубкой с мерной емкостью, выполняющей функцию компенсационного резервуара и позволяющей отслеживать изменение объема ТАМ. Система измерения температуры включала в себя 12 термомпар, размещенных на обеих ГТП пластинах, на жидкостных теплообменниках и их входных и выходных патрубках.

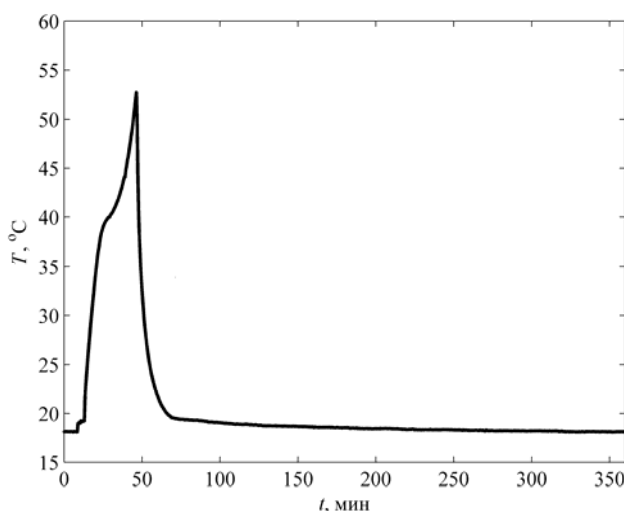
Регистрация значений температуры производилась автоматизированным вычислительным комплексом на базе измерительной системы L-Card E-270 и персонального компьютера. В экспериментах в качестве ТАМ был использован гексадекан ( $C_{16}H_{34}$ ) с температурой плавления 18,2 °С и теплотой фазового перехода 236 кДж/кг. Это вещество при комнатной температуре находится в жидком состоянии, что обеспечивает оптимальные условия для работы компенсационного резервуара.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-47-242005.





Рис. 1. Секция теплового аккумулятора

Рис. 2. Зависимость  $T(t)$  для одного рабочего цикла

В экспериментах рабочий цикл начинался с нагрева ТАМ, изначально находящегося в твердом состоянии. Продолжительность одного рабочего цикла «плавление-замораживание» равнялось 6 часам. В период нагрева были включены нагреватели с фиксированной мощностью при отключенной циркуляции теплоносителя в контуре охлаждения. В момент полного перехода ТАМ в жидкое состояние производилось одновременное отключение нагревателей и включение циркуляции теплоносителя с заданной температурой.

Динамика фазовых превращений в ТА характеризуется временной температурной зависимостью  $T(t)$ , которая приведена на рис. 2 для одного полного рабочего цикла при мощности тепловыделения 75 Вт. На стадии подвода теплоты температура монотонно растет по мере продвижения зоны расплава вглубь ТА. Нагрев продолжался до полного плавления ТАМ, для этого потребовалось 50 мин. Максимальная температура в момент завершения нагрева достигла 53 °С, перепад температуры по длине ГПП пластины не превышал 0,5 °С. В момент завершения подвода теплоты одновременно с отключением нагревателей включалась циркуляция теплоносителя, температура которого на входе в теплообменник задавалась постоянной и равной 15°С. Сначала в процессе теплоотвода

происходило охлаждение ТАМ до температуры затвердевания, затем начиналась кристаллизация ТАМ, в ходе которой происходило нарастание слоя ТАМ, затвердевшего на поверхности ГПП пластины и формирование на нем температурного перепада, приводящего к последующему плавному снижению температуры.

В последующих циклах график температуры имел повторяющийся и периодический характер, амплитуда температурных колебаний составляла около 35 °С.

Таким образом, в экспериментах установлена высокая теплораспределяющая способность ГПП пластины, которая обеспечивает однородность подвода и отвода теплоты в объем ТА. Подтверждена перспективность применения ТА для терморегулирования мощной бортовой радиоэлектронной аппаратуры, работающей в режиме пиковых периодических нагрузок.

#### Библиографические ссылки

1. Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Чеботарев В. Е. Теплофизический анализ теплового аккумулятора для системы терморегулирования мощных блоков радиоэлектронной аппаратуры кратковременного действия // Решетневские чтения : материалы XX Между-

нар. науч. конф. (9–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 220–222.

2. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Расчет температурных полей в тепловом аккумуляторе с фазовым переходом // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (8–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 2. С. 233–234.

3. Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Чеботарев В. Е. Тепловой аккумулятор для системы терморегулирования мощных блоков радиоэлектронной аппаратуры кратковременного действия // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 930–935.

4. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 3. С. 481–488.

5. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко, В. Е. Косенко и др. // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, вып. 6. С. 19–28.

temperature control system of powerful blocks of electronic equipment with a short action time]. *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016. Vol. 1. P. 220–222 (In Russ.)

2. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A. [Calculation of temperature fields in the thermal storage with phase transformation]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. Vol. 2. P. 233–234 (In Russ.)

3. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., Chebotarev V. E. [Thermal storage to the temperature control system of powerful blocks of electronic equipment with a short action time]. *Vestnik SibGAU*. 2016. Vol. 17, № 4. P. 930–935. (In Russ.)

4. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A. The dynamics of phase changes in a heat storage of thermal control system for onboard radio-electronic equipment. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. Vol. 25, № 3. P. 461–467.

5. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., Kosenko V. E. et al. [Computational modeling of heat exchange in thermoregulation systems of space vehicle]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2009. Vol. 14, № 6. P. 19–28. (In Russ.)

#### References

1. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., Chebotarev V. E. [Thermophysical analysis of the thermal storage to the

© Васильев Е. Н., Деревянко В. А.,  
Корхова М. И., 2019

УДК 621.7.09

**ПРОВЕДЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

А. Ю. Володин, Д. И. Савин, И. О. Якубович

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
 Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
 E-mail: 3608318@mail.ru

*Рассмотрена методика проведения испытаний осевого режущего инструмента. Особое внимание уделено влиянию геометрии инструмента на выполнение требуемых задач. Отмечено, что возникает необходимость корректировки геометрии под конкретные задачи производства для получения оптимальных режимов резания и стойкости инструмента.*

*Ключевые слова: осевой инструмент, испытания, период стойкости.*

**PRELIMINARY TESTING OF THE AXIAL CUTTING TOOL**

A. Yu. Volodin, D. I. Savin, I. O. Yakubovich

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
 29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
 E-mail: 3608318@mail.ru

*Review of the methodology for testing an axial cutting tool. Special attention is paid to influence of the geometry parameters of cutting tool on the performance of the required tasks. Noted that there is need to adjust the geometry for specific production tasks to obtain optimal cutting conditions and tool life.*

*Keywords: axial tool, trials, durability period.*

При производстве высокотехнологичной продукции одним из важных составляющих технологического процесса является режущий инструмент, применяющийся для механической обработки деталей из различных материалов, применяющих при производстве деталей ракетно-космической техники. Обеспечение технологического процесса режущим инструментом ведет к большим материальным затратам. Поэтому для снижения расходов на приобретение и повышения стойкости режущего инструмента предлагается проводить предварительные испытания режущего инструмента, с последующей корректировкой геометрии под конкретные задачи производства.

Методика проведения предварительных испытаний режущего инструмента основывается на определении периода стойкости инструмента до полного износа при обработке материалов применяемых при изготовлении деталей ракетно-космической техники.

Для проведения испытаний необходимо провести подбор режимов резания для заданного обрабатываемого материала, рассчитать глубину срезаемого слоя и установить операционное время для выбранного инструмента в условиях проведения испытаний.

Для оценки режущего инструмента в процессе и после обработки существуют критерии, по которым определяется степень износа режущей кромки, нагрузка на режущий инструмент. Фрезы, поступающие для испытаний должны быть в защитной капсуле для предотвращения от повреждения режущих кромок, а также для удобства их перемещения с сохранением

внешнего вида. На рабочей поверхности фрез не должно быть трещин, следов коррозии, на шлифованных поверхностях черновин, выкрошенных мест, на режущих кромках – забоин, прижогов, на хвостовике и центровых отверстиях – заусенцев [1]. Испытания фрез проводятся на заготовке из материала детали с необходимой твердостью, согласно требованиям, указанным в конструкторской документации. Согласно ГОСТ 32405–2013 проводится подбор заготовки из расчета суммарной длины фрезерования при испытании на работоспособность фрез диаметром, указанным в табл. 1 [2].

Таблица 1

**Размеры заготовок для испытаний на работоспособность**

Диаметр фрезы, мм	Суммарная длина фрезерования, мм
от 1,0 до 2,5 включительно	100
свыше 2,5 до 4,0 включительно	200
свыше 4,0 до 6,0 включительно	300
свыше 6,0 до 10,0 включительно	400
свыше 10,0	500

Исходные данные по режимам резания и стойкости назначаются исходя из материала и геометрии фрез в соответствии с ОСТ 92-3256–83 и ГОСТ 32405–2013. Испытания проводятся по трем уровням режима резания: начальном, среднем, максимальном. Начальный режим представляет собой

минимальные параметры нагрузки, рекомендованные ОСТ 92-3256–83 и ГОСТ 32405–2013 на испытуемый диаметр фрезы. Средний режим подбирается исходя из полученных результатов на режимах минимум и максимум. Максимальный режим представляет собой максимальные параметры нагрузки, рекомендованные ОСТ 92-3256–83 и ГОСТ 32405–2013 на испытуемый диаметр фрезы.

Критерием затупления фрез является достижение допустимого износа зубьев по задней поверхности, указанным в табл. 2 [2].

Таблица 2

**Допустимый размерный износ фрез**

Диаметр фрезы, мм	Допустимый износ, мм
от 1 до 3 включительно	0,15
свыше 3 до 6 включительно	0,25
свыше 6 до 10 включительно	0,30
свыше 10 до 16 включительно	0,35
свыше 16	0,50

Стойкость фрезы определяется временем, за которое износ зубьев по задней поверхности достигнет параметра затупления в зависимости от диаметра.

После проведения испытаний фрез на работоспособность, на режущих кромках, не должно быть сколов, выкрашиваний, и они должны быть пригодны к дальнейшей работе.

Внешний вид фрез контролируют визуальным осмотром. По результатам испытаний составляется протокол испытаний с рекомендациями по корректировке

геометрии режущего инструмента, необходимой для выполнения задач производства и установления оптимального режима резания и стойкости инструмента.

Для сокращения затрат на режущий инструмент при разработке технологических процессов механической обработки изделий РКТ и повышения стойкости режущего инструмента необходимо проводить предварительные испытания режущего инструмента с последующей корректировкой геометрии инструмента под конкретные задачи производства.

**Библиографические ссылки**

1. Черепакхин А. А., Солдатов В. Ф. Стойкостные испытания режущего инструмента : монография. М. : РУСАЙНС, 2016. 122 с.
2. ГОСТ 32405–2013. Фрезы концевые цельные твердосплавные. Технические условия (ISO 10911: 2010, MOD). 10 с.

**References**

1. Cherepakhin A. A., Soldatov V. F. Stoykostnyye ispytaniya rezhushchego instrumenta : monografiya. Moscow, RUSAYNS, 2016. 122 p.
2. GOST 32405–2013 Frezy kontsevyye tsel'nyye tverdosplavnyye. Tekhnicheskie usloviya (ISO 10911: 2010, MOD), 10 p.

© Володин А. Ю., Савин Д. И.,  
Якубович И. О., 2019

УДК 621.9.08

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА ИЗДЕЛИЙ РКТ

В. А. Ворожейкин, А. Ю. Литвинчук

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: kras@krasmail.ru

*Вибрация технологической системы СПИД оказывает негативное влияние на качество и производительность обработки вафельного фона изделий ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: производство, технология, механическая обработка, вибрация, анализатор спектра.*

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF VIBRATION OF A TECHNOLOGICAL SYSTEM ON THE QUALITY OF PROCESSING A WAFER BACKGROUND OF PRODUCTS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

V. A. Vorozheykin, A. Ju. Litvinchuk

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: kras@krasmail.ru

*The vibration of the machine tool system has a negative impact on the quality and productivity of processing the wafer background of rocket and space technology products.*

*Keywords: production, technology, machining, vibration, spectrum analyzer.*

По существующей в настоящее время технологии изготовления изделий ракетно-космической техники (РКТ) производится фрезерование вафельного фона (ВФ) в изделиях различной геометрической формы – цилиндрических, конических, сферических и др. [1]. На рис. 1 представлен фрагмент вафельного фона на детали (ДСЕ) изделия РКТ.

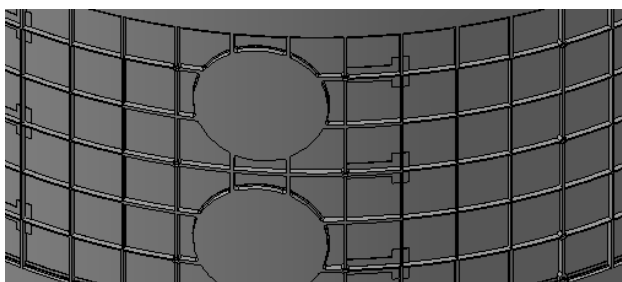


Рис. 1. ДСЕ с вафельным фоном

Используемая технология изготовления ДСЕ с ВФ базируется на специальном технологическом оборудовании и системах подготовки производства: специальные фрезерные станки, например ПФ262Ф4В-2ВФУ и ПФ522Ф4В-2ВФУ с системой слежения за остаточным полотном; системы автоматизированного проектирования, производства и измерения [2].

Технологические возможности специальных фрезерных станков типа ПФ262/ПФ522 позволяют производить высокоскоростную обработку (ВСО) ВФ, однако этому мешает ряд факторов, одним из которых

является вибрация технологической системы СПИД в процессе обработки. Эта система должна быть виброустойчивой и не допускать значительных колебаний. Колебания системы СПИД при механической обработке снижают качество обработанной поверхности, возрастает шероховатость, появляется волнистость по дну, а также дробление на стенках обработанных ячеек [2; 3].

Для оценки численных характеристик в зоне обработки применяется специальный программно-аппаратный комплекс – анализатор спектра ZET017-U4 (анализатор), представленный на рис. 2. Анализатор может быть использован автономно или в составе автоматизированных систем в испытательных и контрольно-измерительных комплексах; в системах управления технологическими процессами; для научно-технических исследований.



Рис. 2. Анализатор спектра ZET017-U4

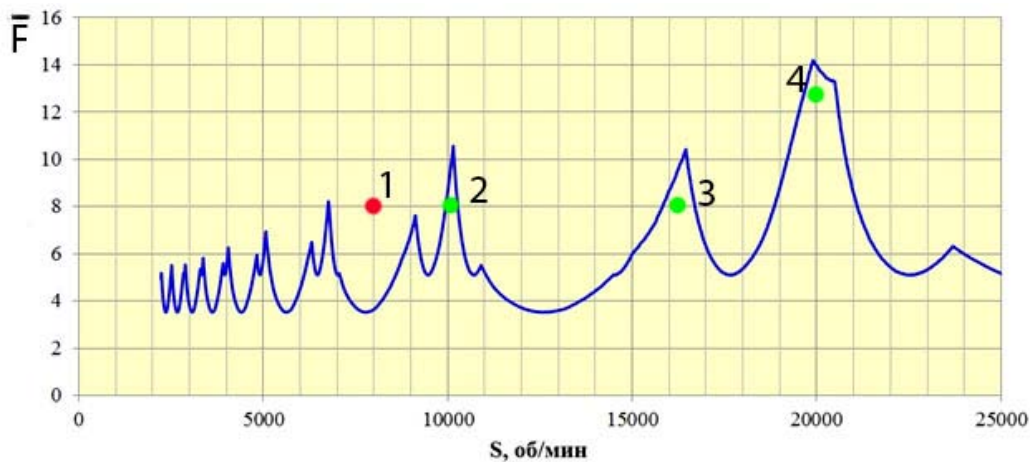


Рис. 3. Зоны стабильного фрезерования в привязке к обобщенному параметру усилий резания  $\bar{F}$

Анализатор является средством измерения параметров электрического сигнала и предназначен для анализа и регистрации спектральной структуры сигналов и генерации сигналов синусоидальной формы.

Обработка данных производится с помощью специального программного обеспечения. При последующем анализе полученных данных появляется возможность определения возможных причин появления вибрации, а также пути снижения её негативного влияния на качество обработанной поверхности и повышения производительности обработки ДСЕ.

Проведён эксперимент со следующими исходными данными:

- оборудование – ПФ262Ф4В-2ВФУ;
- инструментальная оправка – гидравлический патрон, вылет 100 мм;
- режущий инструмент (РИ) – монолитная твердосплавная фреза,  $z = 3$ ,  $D = 16$  мм, вылет 50 мм.

Выполнялось измерение частотного отклика фрезы на кончике РИ, установленного в оправке шпинделя станка. Вибрации возбуждались одиночным ударом силоизмерительным молоточком по поверхности РИ, отклик регистрировался закреплённым на РИ маловесным акселерометром.

Измерение выполнялось в ортогональных направлениях в плоскости, нормаль которой задается осью инструмента. На основе полученных данных построена характеристика стабильности фрезерования по частоте вращения шпинделя, представленная на рис. 3.

По оси  $X$  отложена частота вращения шпинделя. По оси  $Y$  – обобщенный параметр, характеризующий усилия резания и производительность  $\bar{F}$ . Для больших значений  $\bar{F}$  оказывается возможным назначать более высокие значения ширины и глубины фрезерования, а также подачи.

Область графика над кривой соответствует зоне с повышенной вибрацией, под кривой – стабильному фрезерованию.

При движении по оси абсцисс виден ряд максимумов (пиков) – зон стабильности, для которых значе-

ние  $\bar{F}$  в области стабильного резания выше (точки 2, 3 и 4 соответственно).

В зоне этих максимумов устойчивость системы СПИД к вибрациям выше, что позволяет назначать более производительные режимы.

Точка 2 (10000 об/мин) – при такой частоте вращения шпинделя производится обработка по текущей технологии. Данный режим обработки достигнут опытным путём без использования средств измерений, исключительно по внешнему осмотру и оценке качества обработанной поверхности ВФ.

Повышение производительности обработки предполагается при переходе из точки 2 в точки 3 и 4 – 16000 и 20000 об/мин соответственно. При этом увеличение оборотов позволит поднять рабочую подачу и производительность при той же нагрузке на РИ.

Дополнительно точка 4 характеризуется более высокой стабильностью по сравнению с точками 2 и 3. Теоретически это позволит назначить для нее более производительные режимы резания при сохранении высокого качества обработанной поверхности.

Однако необходимо отметить, что полученные на рис. 3 данные не учитывают изменения сил и моментов в процессе фрезерования, определение которых в зависимости от основных технологических и конструктивных параметров (глубина фрезерования, ширина фрезерования, подача на зуб, скорость резания/частота вращения шпинделя, жесткость станка) может скорректировать приведенные границы стабильной обработки [4; 5]

Представленный программно-аппаратный комплекс обладает широкой областью применения для выявления технологических запасов в системе СПИД – применяемых металлорежущего оборудования и технологической оснастки. Определение предельных возможностей системы СПИД позволит назначать более производительные режимы обработки, сократить машинное время на механическую обработку, снизить издержки производства без снижения качества обработанных ДСЕ.

Цель дальнейшего исследования направлена на измерение параметров вибрации (виброускорения, виброскорости и виброперемещения) системы СПИД в процессе механической обработки. Применение анализатора спектра позволит прогнозировать износ РИ по определённым критериям при проведении спектрального анализа.

#### Библиографические ссылки

1. Таурит Г., Пуховский Е., Грищенко Е. Обработка крупногабаритных деталей. Киев : Техніка, 1981. 208 с.
2. Ловыгин А., Теверовский Л. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М. : ДМК Пресс, 2015. 195 с.
3. Раменская Е. В. Повышение качества изготовления корпусных деталей оболочного типа на основе управления вибрацией технологического оборудования : автореф. дис. ... канд. техн. наук, Красноярск, 2007. 51 с.
4. Авилов А. В. Влияние частотных характеристик технологической системы и износа режущего инструмента на точность токарной обработки : дис. ... канд. техн. наук. Ростов-н/Д., 2008, 48 с.
5. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 166 с.

#### References

1. Taurit G., Puhovsky E. *Obrabotka krupnogabaritnih detaley* [Machining of large parts]. Kiev : Tehnika, 1981, 208 p.
2. Lovygin A., Teverovsky L. *Sovremenniy stanok s ChPU i CAD/CAM sistema*. [Modern machine and CAD/CAM system]. Moscow, DMK Press, 2015, 280 p.
3. Ramenskaya E. V. *Povyshenie kachestva izgotovleniya korpusnykh detaley obolochkogo tipa na osnove upravleniya vibratsiey tekhnologicheskogo oborudovaniya*. [Improving the manufacturing quality of shell-type shell parts based on vibration control of machines] Abstract. Candidate of Engineering Sciences, Krasnoyarsk, 2007, 51 p.
4. Avilov A. V. *Vliyanie chastotnykh kharakteristik tekhnologicheskoy sistemy i iznosa rezhushchego instrumenta na tochnost' tokarnoy obrabotki*. [The influence of the frequency characteristics of the technological system and the condition of the cutting tool on the accuracy of turning] Dissertation. Candidate of Engineering Sciences, Rostov-na-Donu, 2008, 48 p.
5. Shirman A. R., Solov'ev A. B. *Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya*. [Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of machines]. Moscow, 1996, 166 p.

© Ворожейкин В. А., Литвинчук А. Ю., 2019

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТВЕРДОГО АНОДИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Н. О. Голубовская, С. И. Кретинин

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: NOGolubovskaya@gmail.com

*Одной из проблем при работе деталей ракетно-космической отрасли является правильная защита от коррозии. Для их изготовления широко применяются алюминий и его сплавы. Для получения деталей с высокой износостойкостью их подвергают глубокому анодированию. В работе проводилась отработка технологии нанесения анодно-окисного твердого и электроизоляционного, а также комбинированного покрытия.*

*Ключевые слова: алюминиевые сплавы, гальванические покрытия, глубокое анодирование, электроизоляционное анодирование.*

## AUTOMATING DEEP ANODIZING PROCESS OF DETAILS FROM ALUMINUM ALLOYS

N. O. Golubovskaya, S. I. Kretinin

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: NOGolubovskaya@gmail.com

*The correct method of corrosion protection is one of the frequent problems in the aerospace engineering. Aluminum alloys are widely used for manufacture parts. One of the methods to obtain functional properties is deep anodizing process. Technologies of wear-resistant anodic-oxide coatings were developed.*

*Keywords: aluminum alloys, galvanic coatings, deep anodizing, electrical insulating anodizing.*

Алюминиевые сплавы широко применяются в производстве ракетно-космической техники, что связано с их высокими удельными характеристиками. В конструкции ракет используют детали, изготовленные из алюминиевых сплавов АМг5, АМг6, АД1, Д16, АК8 и др., которые должны обеспечивать безотказную работу при эксплуатации и сохранять все функциональные свойства во время длительного хранения в присутствии агрессивных сред. Для защиты деталей и узлов ракет от коррозионного разрушения применяются различные покрытия. В настоящее время наиболее распространенным покрытием на поверхности деталей из алюминиевых сплавов является простое анодно-окисное покрытие, глубокое и электроизоляционное анодирование поверхности алюминиевых деталей [1].

Глубокое анодирование алюминия и его сплавов производится с целью получения на поверхности деталей твердой толстой окисной пленки, обладающей высокой износостойкостью.

Основное различие между обычным и глубоким анодированием заключается в том, что электролиз производится в сернокислом электролите при температуре от 0 до  $-10$  °С, при более высоком напряжении и плотности тока. Все операции подготовки поверхности деталей производятся так же, как и при обычном анодировании, вследствие чего ванны с электролитом располагаются на одной гальванической линии [2].

Режим управления автооператорами осуществляется вручную с пульта автооператора или дистанционно через ЭВМ. Для поддержания постоянной температуры в ваннах анодирования используется морозильная установка, параметры с которой выводятся на монитор линии обработки деталей из алюминия и его сплавов. Глубокое анодирование производится в электролите, содержащем серную кислоту и сернокислый алюминий. Режимы устанавливаются в зависимости от марки сплава. Продолжительность процесса устанавливается в зависимости от заданной толщины анодной пленки и период разработки технологического процесса после реконструкции устанавливалась опытным путем в каждом отдельном случае. Ориентировочная продолжительность процесса при толщине пленок 40–100 мкм составляет 1,5–2 часа. Во время процесса необходимо поддерживать температуру электролита постоянной в определенных пределах, что удается достигнуть за счет морозильной установки. Установка отключается автоматически при достижении требуемой температуры, таким образом, удалось исключить применение сухого льда, который в свою очередь отрицательно влиял на качество и внешний вид покрытия, и вводился в ванну анодирования вручную. Плотность тока также необходимо выдерживать в определенных пределах, и, по мере роста окисной пленки, при одном и том же напряжении. Так как вследствие увеличения сопротивления сила тока уменьшается, то ее устанавливают постоян-



ной, а напряжение увеличивают. Данный процесс был автоматизирован путем установки в гальваническую линию выпрямителя нового поколения. Высокий КПД (более 90 %) и коэффициент мощности (около 0,95) во всем диапазоне рабочих температур токов дает экономию электроэнергии. Ввод данных режима процесса анодирования осуществляется на панели управления выпрямителя, что исключает влияние человеческого фактора во время процесса. За счет точности стабилизации и возможности реализации переходного режима удалось внедрить технологии нанесения покрытия на детали сложной конфигурации. Конец процесса определяется моментом выхода режима на максимальное напряжение по заранее введенным данным. Для проверки и отладки процесса проводилось исследование микротвердости покрытия на поперечном шлифе. После проведения экспериментов и отработки режимов технологического процесса получения покрытия Ан.окс.тв были получены детали простой и сложной конфигурации из различных сплавов, отвечающие требованиям конструкторской документации. По аналогии была отработана технология нанесения покрытия Ан.Окс.эиз, которое используют для придания поверхности деталей из алюминия и алюминиевых сплавов электроизоляционных свойств. Сопротивление покрытия пробойю возрастает с увеличением его толщины, уменьшением пористости и повышением качества исходной поверхности. Возможности выпрямителя нового поколения позволяют использовать его как при нанесении твердого, так и электроизоляционного анодного покрытия, процесс также включа-

ет два в себя два шага. Первый шаг занимает 20 минут по времени, толщина пленки увеличивается с минимальной скоростью, после выхода на второй шаг напряжение растет до своего максимального значения быстрее, по сравнению с первым шагом, сила тока изменяется пропорционально напряжению, что указывает на постоянство плотности тока. Качество полученного покрытия оценивали по следующим характеристикам: толщина пленки, микротвердость, сопротивление пробойю. Полученные положительные результаты свидетельствовали о правильно подобранных режимах.

#### Библиографические ссылки

1. Верник С., Пиннер Р. Химическая и электролитическая обработка алюминия и его сплавов. Л. : Судпромгиз, 1960. 387 с.
2. Зальцман Л. Г., Черная С. М. Спутник гальваника. Киев : Техника, 1989. 191 с.

#### References

1. Vernik S., Pinner R. Khimicheskaya i elektroliticheskaya obrabotka alyuminiya i ego splavov [Chemical and electrotechnical processing of aluminum alloys]. Leningrad : Sudpromgiz, 1960, 387 p.
2. Zal'tsman L. G., Chernaya S. M. Sputnik gal'vanika [Assistant of Galvanic]. Kiev, Technique, 1989, 191 p.

© Голубовская Н. О., Кретицин С. И., 2019

## ИСПЫТАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Е. С. Дорофеева

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
 Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
 E-mail: k.e.s.1990@inbox.ru

*Сконструирована и изготовлена специальная фреза для обработки титановых сплавов. Выявлены основные конструкционные показатели, влияющие на время стойкости фрезы и параметры, указывающие на степень износа инструмента. Проведены натурные испытания сконструированной фрезы.*

*Ключевые слова: титановые сплавы, процесс резания, режимы резания, производительность, натурные испытания, стойкость фрезы.*

## TESTING A SPECIAL MILL FOR TREATING TITANIUM ALLOYS

E. S. Dorofeeva

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
 29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
 E-mail: k.e.s.1990@inbox.ru

*A special mill for machining titanium alloys is designed and manufactured. The main structural indicators affecting the howl of the mill resistance and the parameters indicating the degree of tool wear are identified. Field tests of the designed cutter are carried out.*

*Keywords: titanium alloys, cutting process, cutting conditions, productivity, full-scale tests.*

Титан получил широкое распространение в ракетно-космической технике, авиа- и судостроении, так как с его помощью можно получить более легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью. Несмотря на все достоинства титана и сплавов на его основе, при их механической обработке возникает ряд проблем. И основная из них – это быстрый износ режущего инструмента [1].

Выявлено, что особое значение в геометрии фрезы имеет передний угол  $\gamma$  и угол наклона винтовой канавки инструмента  $\omega$ . Считается, чем острее передний угол, тем лучше вести обработку титановых сплавов, а чем больше угол  $\omega$ , тем меньше может быть угол  $\gamma$ . Авторы сходятся во мнении что, чем больше угол наклона винтовой канавки, тем выше стойкость фрезы,

Для теоретического расчета стойкости специальной фрезы взята зависимость (1), отличающаяся введением дополнительного геометрического параметра инструмента,  $\omega$  – угол наклона винтовой канавки [2].

$$T^m = \frac{C_v \cdot D^q \cdot \omega^n \cdot K_v}{V \cdot t^x \cdot S^y \cdot B^u \cdot z^p} \quad (1)$$

Средняя стойкость инструмента диаметром от 12 до 25 мм при обработке титана принята по ГОСТ и составляет 46 минут, а установленное время стойкости составляет  $T = 18$  мин

Испытания проводились для пяти фрез диаметром 16 мм, две из твердого сплава, у которых количество зубьев  $z = 8$  и три из быстрорежущей стали,  $z = 6$  в отличие от стандартных фрез у которых  $z = 4$  для

данного диаметра. Фрезы из твердого сплава испытывались по 46 мин., для установления соответствия стойкости требованиям ГОСТ 23249–78 [3].

Основными показателями оценки износа инструмента приняты – износ по задней поверхности  $h_z$ , шероховатость Ra и шумовое сопровождение.

Режимы резания для проведения эксперимента назначались с учетом рекомендаций, по данным нормативов.

По результатам испытания фрезы 1 испытания фрезы 2 проводились при увеличенных подаче и оборотах в два раза, но с уменьшением глубины резания с 3 до 2 мм. Что в свою очередь привело к уменьшению времени обработки по программе в два раза.

Промежуточные результаты испытания фрез из твердого сплава представлены в таблице.

Теоретический расчет времени стойкости фрезы с использованием зависимости (1) при режимах резания, на которой испытывали фрезу 2, завышенных в 2 раза, показал, что период стойкости будет равен 94 мин.

На основании полученного расчетного времени можно утверждать, что испытываемая фреза отработала лишь половину времени до первой переточки. Установление экспериментального времени работы фрезы требует дополнительных испытаний.

На основании данных эксперимента были построены графики зависимости шероховатости заготовки от времени работы фрезы рис. 1, а также график зависимости величины износа от времени работы (рис. 2).

## Промежуточные результаты испытания фрез 1, 2

№	Время обработки $T_0$ , мин.	Шероховатость $R_a$ , мкм	Величина $h_z$ , мм	Используемое оборудование
Твердый сплав				
Фр 1	10	0,19	0,08	Станок с ЧПУ DMU 50 ecoline, микроскоп VIO 210 microset, устройство для определения шероховатости, определения жесткости, для определения шероховатости
	20	0,2	0,1	
	30	0,24	0,15	
	40	0,25	0,2	
	46	0,28	0,25	
Фр 2	10	0,14	0,07	Станок с ЧПУ DMU 50 ecoline, микроскоп VIO 210 microset, устройство для определения шероховатости, определения жесткости, для определения шероховатости
	20	0,15	0,09	
	30	0,175	0,13	
	40	0,18	0,19	
	46	0,19	0,23	

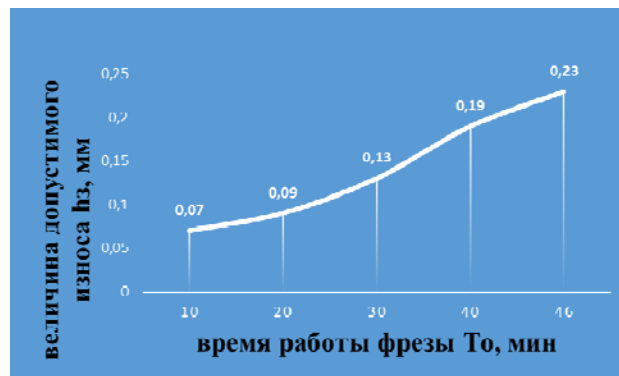


Рис. 1. График зависимости допустимой величины износа от времени работы фрезы 2

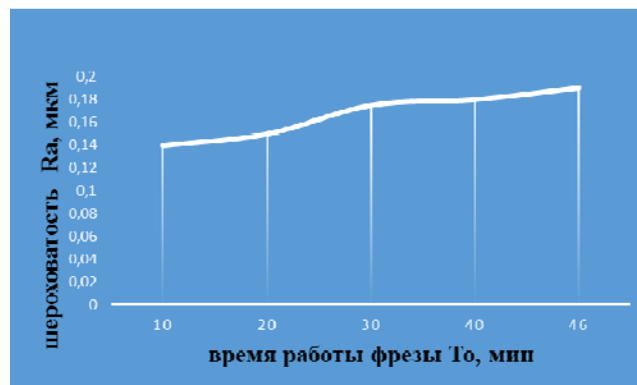


Рис. 2. График зависимости шероховатости от времени работы фрезы 2

По результатам проведенного эксперимента были сделаны выводы о том, что представленная конструкция фрезы является удовлетворительной для обработки титановых сплавов. Главным параметром, оказывающим на это влияние, является угол наклона винтовой канавки и число зубьев.

**Библиографические ссылки**

1. Некоторые особенности механической обработки титановых сплавов / Е. С. Дорофеева, Д. С. Литвиненко, Н. Ф. Янковская и др. // Решетневские чтения :

материалы XXI Междунар. науч. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 494–496.

2. Дорофеева Е. С., Амельченко Н. А. Выбор инструмента для обработки титановых сплавов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (09–13 апреля 2018 г., Красноярск) : в 3 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018. Т. 1. С. 27–29.

3. ГОСТ 23249–78 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-23249-78> (дата обращения: 12.06.2019).

4. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С. А. Рубинштейн, Г. В. Левант, Н. М. Орнис и др. М. : Машиностроение, 1968. 392 с.

5. Критерии износа режущего инструмента [Электронный ресурс]. URL: [https://studopedia.ru/9\\_5625\\_kriterii-iznosa-rezhushchego-instrumenta.html](https://studopedia.ru/9_5625_kriterii-iznosa-rezhushchego-instrumenta.html) (дата обращения: 21.05.2019).

#### References

1. Nekotorye osobennosti mekhanicheskoy obrabotki titanovykh splavov / E. S. Dorofeeva, D. S. Litvinenko, N. F. Yankovskaya et al. // Reshetnevskie chteniya : materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. (08–11 noyabrya 2017, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch. / pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017. P. 494–496.

2. Dorofeeva E. S., Amel'chenko N. A. Vybor instrumenta dlya obrabotki titanovykh splavov // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : sb. materialov XIV Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konf., posvyashchennoy Dnyu kosmonavтики (09–13 aprelya 2018 g., Krasnoyarsk) : v 3 t. / pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2018. T. 1. P. 27–29.

3. GOST 23249–78 [Elektronnyy resurs]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-23249-78> (accessed: 12.06.2019).

4. Osnovy ucheniya o rezanii metallov i rezhushchiy instrument / S. A. Rubinshteyn, G. V. Levant, N. M. Ornis et al. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 392 p.

5. Kriterii iznosa rezhushchego instrumenta [Elektronnyy resurs]. URL: [https://studopedia.ru/9\\_5625\\_kriterii-iznosa-rezhushchego-instrumenta.html](https://studopedia.ru/9_5625_kriterii-iznosa-rezhushchego-instrumenta.html) (accessed: 21.05.2019).

© Дорофеева Е. С., 2019

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ ДЛЯ СВЯЗУЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАКЕТОСТРОЕНИИ**

Т. С. Зайцева<sup>1\*</sup>, Д. В. Ершов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: zaytseva0508@gmail.com

*Проведено исследование модификации на стадии синтеза фенолоформальдегидной смолы, используемой в качестве связующего композиционных материалов, применяемых в ракетостроении.*

*Ключевые слова: связующее, модификация, синтез, композиционный материал, ракетостроение.*

**STUDY OF PROPERTIES OF MODIFIED BINDER PHENOL-FORMALDEHYDE SMOL  
FOR BINDER COMPOSITE MATERIALS USED IN ROCKET SCIENCE**

T. S. Zaytseva<sup>1\*</sup>, D. V. Ershov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: zaytseva0508@gmail.com

*The study of modification at the stage of synthesis of phenol-formaldehyde resin used as a binder of composite materials used in rocket engineering.*

*Keywords: binder, modification, synthesis, composite material, rocket science.*

В настоящее время в ракетостроении находят широкое применение композиционные материалы, при изготовлении которых используются реакционноспособные связующие, обеспечивающие совместно с армирующим материалом изделиям заданный уровень эксплуатационных показателей [1].

Для придания традиционно применяемым фенолоформальдегидным смолам улучшенных показателей проведено исследование возможности проведения модификации смолы на стадии ее синтеза с использованием различных модификаторов (высокомолекулярный – поливиниловый спирт ПВС, углеродный модификатор – активный технический углерод марки N220). Модифицирование смолы проводилось на стадии синтеза для обеспечения лучшего распределения наноразмерного углеродного модификатора в объеме полимерной матрицы.

При исследовании влияния введения модификаторов на свойства смолы использовалось ортогональное планирование двухфакторного эксперимента с уровнями переменных представленными в табл. 1.

В качестве параметров оптимизации из эксплуатационных характеристик смолы выбраны наиболее важные технологические характеристики (условная вязкость и время желатинизации). Данные параметры, определяемые по ГОСТ 20907-2016 «Смолы фенол-

формальдегидные жидкие. Технические условия» [2], отвечают за эффективность связующего по степени смачивания армирующего волокнистого материала и продолжительности нахождения смолы в состоянии пригодном для обработки и применения.

По результатам испытаний синтезированных модифицированных смол были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии для каждого параметра оптимизации. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Исходя из полученных уравнений регрессии, рассчитаны и построены контурные кривые (см. рисунок), при помощи которых наглядно отслеживается изменение оптимизируемых параметров от содержания модификаторов введенных при синтезе смолы.

В результате сравнительного анализа полученных зависимостей видно, что наибольшее влияние на свойства смолы оказывает содержание наноразмерного углеродного модификатора. С увеличением его содержания увеличивается вязкость смолы и уменьшается время желатинизации [3]. Изменение свойств смолы от содержания ПВС носит обратный характер.

Тем самым можно в широких пределах варьировать эксплуатационные параметры получаемой смолы используемой в качестве связующего при изготовлении композиционных материалов в ракетостроении.

Таблица 1

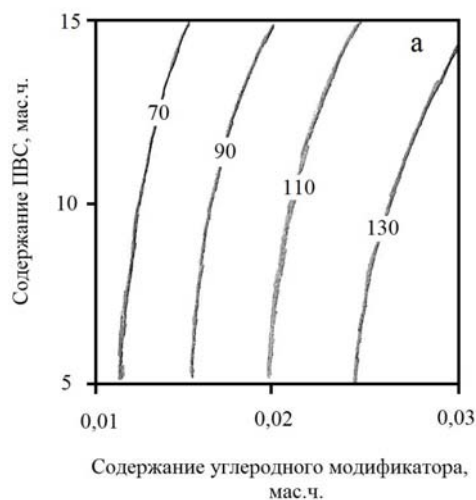
## Уровни переменных в условном и натуральном масштабе

Варьируемые параметры	Фактор	Единицы измерения	Значения уровней переменных в натуральных величинах, соответствующее усл. ед		
			-1	0	+1
Содержание ПВС	X <sub>1</sub>	мас.ч.	5	10	15
Содержание углеродного модификатора	X <sub>2</sub>	мас.ч.	0,01	0,02	0,03

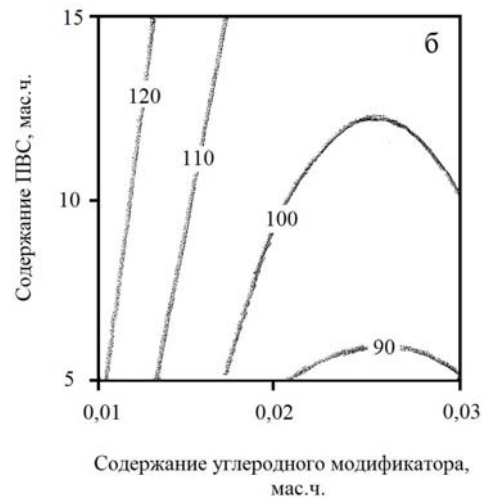
Таблица 2

## Коэффициенты математической зависимости исследуемых свойств смолы

Коэффициенты уравнений регрессии	Исследуемые свойства	
	Условная вязкость, с	Время желатинизации, с
b <sub>0</sub>	104,7	100,741
b <sub>1</sub>	-9,667	6,0
b <sub>2</sub>	43,333	-13,5
b <sub>11</sub>	-3,0	-1,667
b <sub>22</sub>	-7,0	12,833
b <sub>12</sub>	-1,0	2,5



а



б

Влияние содержания модификаторов на свойства смолы:  
 а – условная вязкость, с; б – время желатинизации, с

## Библиографические ссылки

1. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.
2. ГОСТ 20907–2016. Смолы фенолоформальдегидные жидкие. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2017. 19 с.
3. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / под ред. А. А. Берлина. СПб. : Профессия, 2009. 560 с.

## References

1. Torlova A. S., Vitkalova I. A., Pikalov E. S. Tekhnologii proizvodstva, svoystva i oblasti primeneniya kompozitsiy na osnove fenolformal'degidnykh smol // Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki. 2017. № 2. P. 96–114.
2. GOST 20907–2016. Smoly fenoloformal'degidnye zhidkie. Tekhnicheskie usloviya. Moscow, Standartinform, 2017. 19 p.
3. Polimernye kompozitsionnye materialy. Svoystva. Struktura. Tekhnologii / Pod red. A. A. Berlina. SPb. : Professiya, 2009. 560 p.

© Зайцева Т. С., Ершов Д. В., 2019

УДК 621.357.74

## ЕМКОСТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

И. Э. Кимм\*, К. Б. Сарапулов

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
\*E-mail: jgorkimm@yandex.ru

*В настоящее время актуальным становится вопрос конверсии производства предприятий военно-промышленного комплекса на выпуск широкой номенклатуры продукции гражданского назначения с использованием технологий, наработок и производственных мощностей ракетно-космического производства.*

*Ключевые слова: технологии РКТ, продукция двойного назначения, конверсия.*

## CAPACITIVE EQUIPMENT USING ROCKET AND SPACE TECHNOLOGIES

I. E. Kimm\*, K. B. Sarapulov

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
\*E-mail: jgorkimm@yandex.ru

*Currently, the issue of conversion of production of enterprises of the military-industrial complex to the production of a wide range of civilian products using technologies, developments and production capacities of rocket and space production is becoming urgent.*

*Keywords: RKT technologies, dual-use products, conversion.*

Технологии ракетно-космической отрасли содержат огромный опыт производственно-конструкторских наработок. Для обеспечения экономического роста и поднятия ВВП страны их использование может значительно повысить качественные и количественные показатели гражданских изделий, широко используемых в производстве и в быту.

Ввиду особо жестких требований предъявляемых к качеству изделий космического и военного назначения предприятия оборонно-промышленного комплекса имеют значительную производственную базу, дорогостоящее и сложное станочное и испытательное оборудование, особенные способы организации производственного процесса.

Ракетно-космическое производство имеет большой опыт работы с алюминиевыми сплавами, что является значительным преимуществом перед отраслями общего машиностроения. На предприятиях ВПК существуют и развиты технические службы входного контроля, отслеживающие качество используемых в производстве материалов от фасонного сортамента до многотонных поковок по спецзаказам, проводится пооперационный контроль качества продукции. Наиболее широкое применение среди алюминиевых сплавов для изготовления конструкций находят сплавы АМг3, АМг5, АМг6.

В настоящее время алюминий и его сплавы применяют во многих областях промышленности и техники.

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов очень высока во многих средах, что связано с ярко выраженной способностью алюминия пассивировать-

ся. На воздухе поверхность алюминия быстро теряет металлический блеск, покрываясь тонкой и прочной защитной пленкой, состоящей из оксида алюминия. Защитная пленка предохраняет металл от дальнейшего окисления. Толщина защитной пленки обычно 50...70 Ангстрем. Алюминий и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в нефти, нефтепродуктах, газовом конденсате и сжиженных газах, в сероводородсодержащих средах, характерных для нефтяной промышленности, что является весьма ценным качеством их как перспективных конструкционных материалов в резервуаростроении [1].

Непрерывное возрастание добычи нефти и газа достигается освоением новых месторождений, увеличением глубин скважин, интенсификацией методов добычи, поэтому особенно ценным и важным направлением внедрения ракетно-космических технологий является производство емкостного оборудования для нефтяной промышленности.

Одной из проблем доставки емкостного оборудования в районы Крайнего Севера является отсутствие транспортной инфраструктуры. Доставка осуществляется воздушным и наземным транспортом. В связи с этим логистика остро ставит вопросы о предельных массах доставляемого оборудования и грузов, значения которых ограничиваются грузоподъемностью транспортных средств и состоянием транспортных путей. Высокая удельная прочность алюминиевых сплавов в сочетании с низкой удельной плотностью относительно стали (примерно в три раза меньше) позволяет уменьшить массу емкостного оборудования, облегчить их транспортабельность.

Емкостное оборудование может представлять собой сварную конструкцию, состоящую из обечаек диаметром до 3 000 мм. Использование штампового производства позволяет оснастить емкости алюминиевыми торосферическими днищами собственного изготовления взамен покупных эллиптических днищ. Объем емкости определяется по заказу количеством блоков (обечаек).

Емкости могут изготавливаться в различных вариантах исполнения: горизонтальные, вертикальные, одностенные, двустенные, одно- и двух секционные. Емкости оборудуются сливными и заливными патрубками, люками-лазами, предохранительными клапанами, приборами КИПиА, наружной и внутренней лестницами, обслуживающими площадками, системой подогрева, тепловой изоляцией.

Использование электронно-лучевой сварки (ЭЛС) позволяет сохранить высокие механические свойства корпусов и обечаек емкостного оборудования. В процессе электронно-лучевой сварки происходит минимальный разогрев металла в зоне сварного шва, что позволяет сохранить высокие прочностные показатели корпуса емкости. Сварные швы емкости проходят радиографический или ультразвуковой контроль. Для проверки на прочность и герметичность емкости подвергаются гидравлическим испытаниям.

Нормативным техническим документом, регламентирующим изготовление алюминиевых емкостей, является ОСТ 26-01-1183-82 «Сосуды и аппараты алюминиевые. Общие технические условия» [2].

Алюминиевое емкостное оборудование должно быть сертифицировано в соответствии с техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (ТР ТС 032/2013) [3].

Для защиты от воздействия внешних климатических факторов на наружные поверхности емкости может быть нанесено стойкое химическое покрытие Ан.Окс [4], которое придает поверхности алюминия и его сплавов высокие коррозионную стойкость.

Существенно повысить надежность и долговечность емкостного оборудования возможно путем нанесения на внутреннюю поверхность фторопластового покрытия. Адгезионное соединение металла с фторопластом достигается следующими способами: наплавкой пластмассы; отверждением полимерного покрытия на металле; соединением с помощью адгезионного слоя клея. Наплавку на металлах полимерного слоя производят путем вихревого или газонаполненного напыления порошков. Кроме порошков таким способом можно наплавлять и пленки. Наиболее целесообразна прямая экструзия пленки на обработанный и подогретый металл. Прочность полученных таким способом соединений достигает 2–18 МПа [5]. Также известны способы нанесения полимерных покрытий на металлические поверхности путем использования фторопластовых суспензий. Покрытия наносятся на очищенные и обезжиренные поверхности методами полива, окунания, пульверизации слоями, толщиной от 10 до 100 мкм в зависимости от свойств полимера или суспензионной среды. Сушка каждого

слоя производится отдельно. После последнего сплавления детали и изделия с покрытием подвергаются термообработке, а затем медленно охлаждаются на воздухе, либо подвергаются закалке в воде для повышения эластичности и улучшения адгезии [6].

В качестве примера емкостного оборудования возможного для организации производства на АО «Красмаш» можно предложить горизонтальную емкость из алюминиевого сплава АМгб с внутренним вафельным фоном (рис. 1, 2).

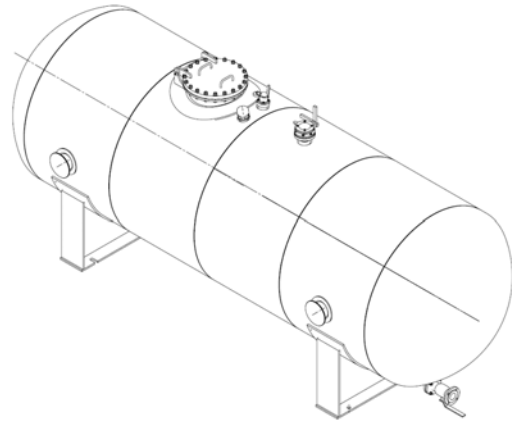


Рис. 1. Горизонтальная емкость для нефтепродуктов

Обечайки с вафельной конструкцией получили достаточно широкое распространение в ракетно-космической технике.

Первое промышленное применение таких обечаек в нашей стране зафиксировано в начале 1960-х годов, когда в КБ «Салют» началось производство ракет УР-200, УР-500 и УР-100. В процессе проектирования баков этих ракет была впервые в стране предложена и реализована конструкция обечайки бака с частой сеткой подкрепляющих ребер, получившая впоследствии широкое распространение в ракетостроении под названием вафельной.

Несмотря на значительно большую трудоемкость в изготовлении по сравнению с гладкими обечайками, обечайки с вафельным фоном менее чувствительны к локальным вмятинам глубиной до половины высоты вафельной панели и обладают значительно большей несущей способностью при осевом сжатии, чем равные им по весу гладкие. А конструкции с минимальной массой и максимальными прочностными характеристиками особенно актуальны для изделий ракетно-космической техники, где важен и дорог каждый килограмм выведенной полезной нагрузки на орбиту.

Перевод либо задействование средств технологического оснащения для серийного производства позволит выпускать емкостное оборудование под необходимые цели с обеспечением требуемых технических параметров.

Основные технические параметры алюминиевых емкостей возможные к изготовлению представлены в таблице.



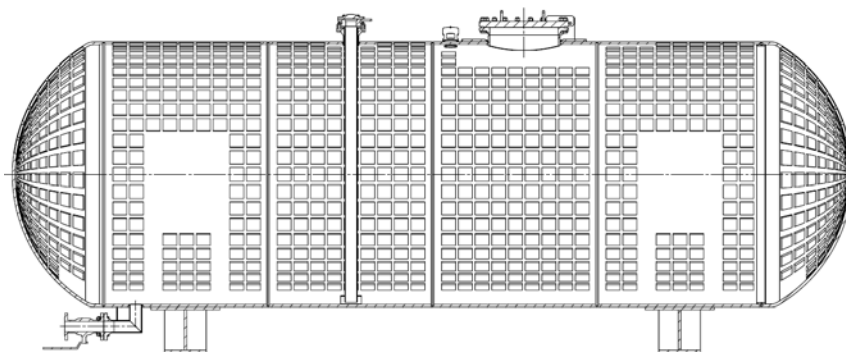


Рис. 2. Горизонтальная емкость в разрезе для нефтепродуктов

### Основные технические параметры алюминиевых емкостей

Технические характеристики	Показатели
Диаметр, мм	до 3000
Длина, мм	до 8000
Вместимость, м <sup>3</sup>	до 50
Рабочее давление, МПа, не более	0,4
Температура эксплуатации, °С	-70 ... +150
Рабочие среды	нетоксичные, невзрывоопасные

Производственные, технологические возможности АО «Красмаш» позволяют осуществить цикл изготовления опытных образцов емкостного оборудования и их испытания.

Таким образом, АО «Красмаш» способно стать изготовителем емкостного оборудования из алюминиевых сплавов.

#### Библиографические ссылки

1. Кравцов В. В. Защита от коррозии внутренней поверхности стальных резервуаров : учеб пособие. Изд-во УГНТУ, 2003. 110 с.
2. ОСТ 26-01-1183-82. Сосуды и аппараты алюминиевые. Общие технические условия.
3. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (ТР ТС 032/2013).
4. ГОСТ 9.005-72. Единая система защиты от коррозии и старения.
5. Ковачич Л. П. Склеивание металлов и пластмасс : пер. со словацкого / под ред. А. С. Фрейдина. М. : Химия, 1985. 172 с.

6. Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы: Свойства и определение : справочник. 3-е изд., перераб. Л. : Химия, 1978. 105 с.

#### References

1. Kravtsov V. V. Zashchita ot korrozii vnutrenney poverkhnosti stal'nykh rezervuarov : ucheb posobie. Izd-vo UGNTU, 2003. 110 p.
2. OST 26-01-1183-82. Sosudy i apparaty alyuminievye. Obshchie tekhnicheskie usloviya.
3. Tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti oborudovaniya, rabotayushchego pod izbytochnym davleniem» (TR TS 032/2013).
4. GOST 9.005-72. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya.
5. Kovachich L. P. Skleivanie metallov i plastmass : per. so slovats / Pod red. A. S. Freydina. Moscow, Khimiya, 1985. 172 p.
6. Katsnel'son M. Yu., Balaev G. A. Plasticheskie massy: Svoystva i opredelenie : spravochnik. 3-e izd., pererab. Leningrad, Khimiya, 1978. 105 p.

© Кимм И. Э., Сарапулов К. Б., 2019

УДК 629.7

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ТРУБЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДНИКОМ

Е. В. Красилова, С. А. Пикулин, А. В. Гирн

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*Рассмотрена технология создания композитной трубы с закладным элементом, изготовленной методом намотки нитью. Предлагается форма переходника, обеспечивающая удобство изготовления и прочность соединения.*

*Ключевые слова: переходник, намотка нитью, композиционные материалы.*

## MANUFACTURING TECHNOLOGY OF COMPOSITE TUBE CONNECTION WITH METAL ADAPTER

E. V. Krasilova, S. A. Pikulin, A. V. Girn

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*The paper considers the technology of creation of composite tube with a mortgage element by winding thread. The description offers a form of adapter that provides ease of manufacture and strength of the connection.*

*Keywords: adapter, winding thread, composite materials.*

При конструировании узлов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) возникают трудности на этапе сопряжения деталей. Для прочного и надежного крепления элементов необходимо предусмотреть возможность применения металлических переходников [1].

Одним из основных методов создания изделий из ПКМ является намотка [2]. Намотка позволяет создавать детали сложных форм, рационально распределять волокна вдоль направлений действия нагрузок, выполнять комбинированные соединения металл-композит, например, путем вматывания фланцев и закладных элементов.

Ранее в работе [3] нами было испытано на прочность при растяжении соединение композитной трубы с металлическим переходником, созданное с помощью намотки стеклотканью. Разрушение произошло в месте стыка переходника с трубой. При этом возникли следующие проблемы: образование складок и полостей при намотке на переходник и неплотное прилегание трубы к переходнику в месте стыка; неравномерность пропитки ткани смолой.

Для решения данных проблем была разработана новая форма переходника и рассмотрен способ намотки с помощью нити. Использование нити вместо ткани позволяет точнее повторить форму поверхности, на которую она наматывается, а также повышает степень пропитки связующим волокна.

Намотка на цилиндрический участок происходит по винтовой линии (рис. 1). Для перекрестной схемы армирования цилиндрической оболочки при спиральной намотке оптимальный угол относительно оси трубы  $\beta_{opt} = 55^\circ$  [2]. На участке расширения траектория нити продлена по прямой, касательной к винтовой линии (рис. 1, а).

Формой оболочки, получаемой при вращении данной прямой вокруг оси трубы, является гиперboloид вращения. Таким способом будет устранен изгиб нити на данном участке, что повысит прочность в месте стыка трубы с переходником, а также позволит использовать для создания детали лишь намотку без применения каких-либо дополнительных методов, например, контактно-вакуумного формования [2].

Переход от расширяющейся гиперболической поверхности к цилиндрической скруглен. Намотка на цилиндрическую часть осуществляется по принципу, изложенному выше для трубы (рис. 1, б). Переход к канавке также выполнен в виде гиперboloида вращения (рис. 1, в) для предотвращения появления изгиба нити при намотке в прямом и обратном направлении.

Внутренняя поверхность канавки представляет собой усеченный конус, что необходимо для обеспечения возвращения нити в обратном направлении при перекрестной намотке по дуге эллипса. Итоговая схема намотки представлена на рис. 1, д, з.

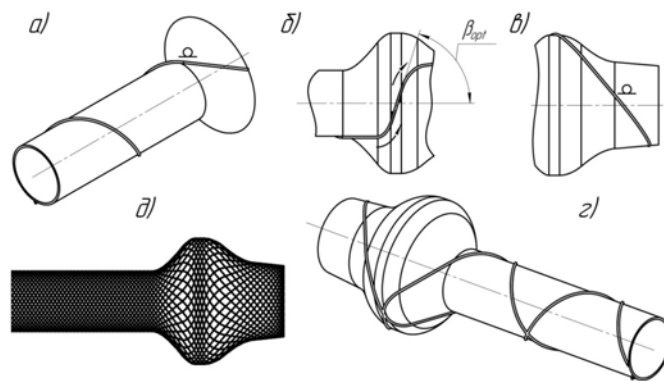


Рис. 1. Схема намотки:  
 а – намотка на гиперboloид; б – изгиб нити; в – участок зацепления;  
 з – траектория отдельной нити; д – оболочка

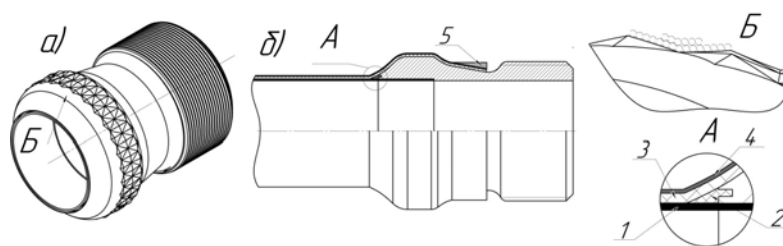


Рис. 2. Соединение:  
 а – переходник; б – схема соединения

Для направления нити в местах резкого изгиба на цилиндрическом участке, возникающих при переходе от расширяющейся части трубы по скруглению (на рис. 1, б показано стрелками), выполняются специальные канавки (рис. 2, а).

Для предотвращения неплотного прилегания трубы к переходнику в месте стыка в переходнике предусмотрен специальный паз под уплотнительное кольцо. За счет сил давления от натяжения нити кольцо обеспечивает необходимую форму снаружи, а внутри – более плавный переход между материалами.

Процесс намотки композитной трубы с закладным элементом происходит следующим образом (рис. 2, б). На предварительно обезжиренную поверхность цилиндрической оправки наносится антиадгезионное покрытие, наматывается герметизирующий слой 1. Далее переходник устанавливается на оправку, покрывая герметизирующий слой на длину выполненного в нем паза. Переходник фиксируется относительно оправки стопорным кольцом. Затем в него закладывается уплотнительное кольцо 2. Конструкция закрепляется в намоточном станке, обеспечивающем непрерывную намотку оболочки сложной формы путем регулирования натяжения нити и скорости вращения. По описанной ранее схеме (рис. 1) производится намотка основного слоя 3, воспринимающего нагрузку. Последним наносится слой защитного покрытия 4, который в зависимости от условий работы и назначения трубы может отсутствовать. На завершающем этапе в канавку наматываются кольцевые вставки 5, обеспечивающие компенсацию действия изгибающих

моментов. После полимеризации конструкция снимается с оправки.

Предложенная в статье конструкция соединения обеспечит плотное прилегание трубы к переходнику, равномерность пропитки армирующего волокна связующим и простоту изготовления. В дальнейшем планируется выполнить расчеты напряженно-деформированного состояния, с помощью которых можно будет определить оптимальные размеры элементов переходника; а также получить экспериментальные данные для подтверждения расчетов.

#### Библиографические ссылки

1. Шатров А. К. Проектирование и расчет на прочность соединений деталей из композиционных материалов : учеб. пособие / Краснояр. ин-т косм. техники. Красноярск, 1992. 65 с.
2. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.: ил.
3. Разработка и испытание металлического переходника для труб из композиционного материала [Электронный ресурс] / С. А. Пикулин, Е. В. Красилова, М. И. Смирнова [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы XV междунар. науч.-практ. конф. творческой молодежи (8–12 апреля 2019 г., Красноярск) : в 3 т. Т. 1. / под общ.ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2019.

**References**

1. Shatrov A. K. *Proektirovanie i raschet na prochnost' soedinenij detalej iz kompozicionnyh materialov* [Design and calculation of the strength of the joints of parts made of composite materials]. Krasnoyarsk, Krasnoyarskij institut kosmicheskoy tekhniki Publ., 1992, 65 p.
2. Komkov M. A., Tarasov V. A. *Tekhnologiya namotki kompozitnyh konstrukcij raket i sredstv porazheniya* [The technology of filament winding composite structures of missiles and weapons]. Moscow, MGTU Publ. 2011, 431 p.
3. Pikulin S. A., Krasilova E. V., Smirnova M. I., Rudenko M. S., Girn A. V. [Designing and testing of the metal adapter for the pipe made of composite material]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: tezisy XV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoj molodezhi (8–12 aprelya 2019 g., Krasnoyarsk : v 3 t. Pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova* [Actual problems of aviation and astronautics: proc. XV international scientific and practical conference of creative youth (8–12 April 2019, Krasnoyarsk): in 3 T. Ed. Yu. Loginov]. Krasnoyarsk, 2019, (In Russ.).

© Красилова Е. В., Пикулин С. А., Гирн А. В., 2019

УДК 621.792.053

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТОСТРОЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ УРОВНЕ

В. А. Львов

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: vaslvov@mail.ru

*Представлены сведения по применяемым технологиям и оборудованию для электронно-лучевой сварки.*

*Ключевые слова: электронный луч, вакуум, высоковольтный источник питания, сложная пространственная траектория, электронно-лучевая пушка.*

## ELEKTRON BEAM WELDING OF LARGE ROCKET PRODUCTS AT THE MODERN LEVEL

V. A. Lvov

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: vaslvov@mail.ru

*The paper presents information on the applied technologies and equipment for electron beam welding.*

*Keywords: electron beam, vacuum, high voltage power supply, complex spatial trajectory, electron beam gun.*

Электронно-лучевая сварка является одним из способов обработки материалов, который используется в промышленности.

В ракетостроении электронно-лучевая сварка применяется для изготовления деталей и сборочных единиц из разных материалов, различных толщин и габаритов.

Применение данного вида сварки в ракетостроении обусловлено тем, что по сравнению с другими известными сварочными процессами ЭЛС отличается рядом особенностей и преимуществ. Высокая концентрация энергии в электронном луче обуславливает возможность получения сварных швов с минимальными размерами зоны термического влияния, большим отношением глубины к ширине проплавления (до 20:1 и более), малой погонной энергией (15–20 % от количества энергии, затрачиваемой при дуговой сварке под флюсом при равной толщине металла), а также способствует избирательному испарению металла и образованию узкого глубокого канала. По каналу луч проникает вглубь материала, вызывая его дальнейшее плавление и испарение, что позволяет сваривать детали толщиной до 100 мм и более за один проход. Малый объем литого металла, а также кратковременность теплового воздействия обеспечивают незначительные термические деформации свариваемых деталей [1].

Данный способ сварки, применяемый в ракетостроении, также обуславливает уменьшение массогабаритных характеристик свариваемых деталей и в целом всего изделия, по сравнению с другими способами сварки.

Сущность процесса сварки электронным лучом в вакууме состоит в использовании кинетической энер-

гии электронов, быстро движущихся в вакууме. При бомбардировке электронами поверхности металла. Подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепло, которое используется для расплавления металла [2].

С 60-х годов прошлого века для электронно-лучевой сварки создано большое количество разнообразных по назначению и конструкции электронно-лучевых установок.

Установки для ЭЛС состоят из двух основных комплексов – электромеханического и энергетического.

Электромеханический комплекс предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема вакуумной камеры, выполнения всех сварочных, установочных и транспортных перемещений свариваемого изделия и электронно-лучевой пушки, выполнения вспомогательных операций и управления всеми этими процессами. В состав этого комплекса входят вакуумная камера, откачная вакуумная система, сварочные манипуляторы, системы наблюдения, вспомогательные устройства и механизмы, а также система управления электрооборудованием этих устройств.

К энергетическому комплексу относится аппаратура, предназначенная для формирования пучка электронов с заданными параметрами и управления его мощностью и положением относительно свариваемого стыка. В состав энергетического комплекса входят электронно-лучевая пушка, высоковольтный источник питания, системы управления и контроля [1].

В систему управления электронно-лучевой установкой входят шкафы управления электромеханическим, вакуумным и энергетическим комплексом, а также пульты управления для каждого комплекса.

Сложность управления электронно-лучевой установкой обуславливалось тем, что операторам-сварщикам необходимо было управлять каждым комплексом (электромеханическим, вакуумным, энергетическим) с отдельного пульта, а в иных случаях производить открывание, закрывание различных систем вакуумного комплекса вручную. Особенно это затруднено при работе на больших установках с рабочим объемом вакуумной камеры более 30 м<sup>3</sup> для сварки крупногабаритных изделий.

В настоящее время во всех современных моделях электронно-лучевых установок используются компьютерные технологии, так что вероятность человеческого фактора крайне мала. Элементарной базой системы управления является микропроцессор. Все программное управление может осуществляться одним достаточно мощным компьютером, либо системой компьютеров, среди которых есть центральные и местные микропроцессоры, на которых выполняется локальное управление одним или несколькими устройствами. Управление всеми комплексами установки производится с одного пульта оператора. Основным элементом пульта является сенсорный монитор, который предназначен для отображения состояния всех систем установки и управления ими. В состав пульта оператора также входит кнопочная панель, предназначенная для включения установки, и телевизор, на который выводятся изображения от видеосистем. Многие процессы проходят в автоматическом режиме, оператор может не присутствовать на рабочем месте [3].

Сочетание точной техники с компьютерными системами управления устраняет зависимость качества сварных соединений от физических способностей оператора-сварщика: точное ведение луча по стыку, изменение мощности луча и фокусировки на требуемом отрезке траектории стыка обеспечивается программными средствами.

В установках с внутрикамерным расположением электронно-лучевых пушек имеется возможность сварки соединений горизонтальным или наклонным

лучом по сложным пространственным траекториям с использованием манипулятора ЭЛП типа «рука» [4].

Установка электронно-лучевой сварки хоть и стоит недешево, но с ее помощью можно сварить даже металл с керамикой, не говоря уже о простой сварке двух металлических деталей. Да и сама электронно-лучевая сварка очень технологична и шагает в ногу со временем. При этом сварочный процесс очень экономичный и не требует больших затрат [3].

Из вышеперечисленного можно сделать вывод, что с развитием электроники и компьютеризации процессов стало возможным практически полностью автоматизировать процесс управления всеми комплексами, входящими в состав электронно-лучевой установки и минимизировать участие человека.

#### Библиографические ссылки

1. Оборудование для электронно-лучевой сварки / А. И. Чвертко, О. К. Назаренко, А. М. Святский, А. И. Некрасов. К. : Наукова думка, 1973.
2. Назаренко О. К., Истомин Е. И., Локшин В. Е. Электронно-лучевая сварка. Харьков : Харьковская типоофсетная фабрика, 1985.
3. Electronic textbook [Электронный ресурс]. URL: <http://www.svarkaed.ru> (дата обращения: 02.09.2019).
4. Electronic textbook [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niti-progress.ru> (дата обращения: 02.09.2019).

#### References

1. Oborudovanie dlya elektronno-luchevoy svarki / A. I. Chvertko, O. K. Nazarenko, A. M. Svyatskiy, A. I. Nekrasov. Kiev, Naukova dumka, 1973.
2. Nazarenko O. K., Istomin E. I., Lokshin V. E. Elektronno-luchevaya svarka. Khar'kov, Khar'kovskaya tipooofsetnaya fabrika, 1985.
3. Electronic textbook [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.svarkaed.ru> (accessed: 02.09.2019).
4. Electronic textbook [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.niti-progress.ru> (accessed: 02.09.2019).

© Львов В. А., 2019

## АЛЬФИРОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ВАКУУМЕ

И. Е. Матчин

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: matchin.ilya@mail.ru

*Рассматривается повышение износостойкости и твердости поверхности деталей из титановых сплавов, применяемых в ракетно-космической технике, посредством химико-термической обработки – альфирования.*

*Ключевые слова: химико-термическая обработка, альфирование.*

## OXIDATION TITANIUM ALLOYS IN VACUUM

I. E. Matchin

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: matchin.ilya@mail.ru

*Increase of wear resistance and surface hardness of part made of titanium alloys used in rocket and space technology through chemical-thermal treatment – oxidation.*

*Keywords: chemical heat treatment, oxidation.*

Титан и его сплавы широко распространены в машиностроении, но ввиду большого коэффициента трения и низкой износостойкости имеют ограниченное применение для деталей, работающих на трение. В частности, детали из титановых сплавов применяются в гидравлической системе управления рулевыми приводами ракетно-космической техники. Для повышения износостойкости и снижения коэффициента трения деталей из титанового сплава применяется химико-термическая обработка – альфирование.

Альфирование повышает износостойкость поверхности титана в 8–10 раз, но снижает пластичность и особенно усталостную прочность на 15–40 %.

На этапе освоения технологии альфирования, детали, помещенные в сухой графит, нагревали при 800 °С в течение 8–8,5 часов [1].

В процессе нагрева образуется диффузионный слой, состоящий из альфированного слоя (твердого раствора кислорода в титане) и слоя окислов, карбоокислов титана. Слой окислов и карбоокислов имеет плотное строение и прочно связан с альфированным слоем. Удаление окислов и карбоокислов с альфированной поверхности полированием существенно уменьшает снижение усталостной прочности деталей.

Поскольку при нагреве все поверхности деталей подвергаются альфированию, то для поверхностей, не требующих упрочнения, предусматривают припуск порядка 0,1–0,2 мм, который после альфирования снимается механической обработкой, полированием.

Поверхность перед альфированием должна быть не ниже 7 класса. В процессе альфирования в графите наблюдается коробление деталей и увеличение размеров.

Для уменьшения коробления и сохранения требуемых размеров после альфирования была опробована и внедрена технология альфирования деталей из титанового сплава ВТ6 в вакууме.

Технология альфирования в вакууме имеет ряд преимуществ по сравнению с альфированием в графите:

- исключается применение графита с предварительной его прокалкой при 850 °С в течение 24 часов;
- исключается необходимость изготовления контейнеров для альфирования и коробов для прокалки графита;
- на поверхности отсутствуют окислы и карбоокислы.

Для альфирования в вакууме был выбран идентичный режим, нагрев до температуры 800±10 °С, выдержка 8–8,5 часов в вакууме, уровень вакуума  $5 \cdot 10^{-1}$ . Уровень вакуума не ниже  $5 \cdot 10^{-1}$ , обеспечивает взаимодействие титана с кислородом. Выбор указанного интервала температур обоснован тем, что при окислении титана при температуре ниже 700 °С толщина альфированного слоя очень незначительна и практически мало зависит от времени. Повышение температуры выше 900 °С сопровождается сильной порчей структуры и значительным падением механических свойств сердцевины [2]. При температуре нагрева до 800 °С и небольших выдержках при альфировании окалина на титане имеет относительно плотное строение и прочно связана со слоем монооксида титана и тем самым с сердцевиной металла. Высокотемпературное альфирование при 800±10 °С в вакууме при выдержке 8–8,5 часов и охлаждении с печью в вакууме позволило получить слой 0,057–0,064 мм, требуе-

мый слой должен быть  $\geq 0,04$  мм. Альфированный слой отличается по структуре от основного металла повышенным содержанием  $\bar{\alpha}$ -фазы, что легко выявить металлографическим анализом.

Альфирование в вакууме экономически целесообразно. При альфирании в вакууме слой окислов и карбоокислов отсутствовал, а главное – решена проблема коробления.

#### Библиографические ссылки

1. Колачев Б. А., Габидуллин Р. М., Пигузов Ю. В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов : учеб. пособие для вузов. М. : Металлургия, 1980. 280 с.

2. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. Л. : Машиностроение, 1977. 248 с.

#### References

1. Kolachev B. A., Gabidullin R. M., Piguzov Yu. V. Tekhnologiya termicheskoy obrabotki tsvetnykh metallov i splavov : Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow, Metallurgiya, 1980. 280 p.

2. Titanovye splavy v mashinostroenii / B. B. Chuchulin, S. S. Ushkov, I. N. Razuvaeva, V. N. Gol'dfayn. Leningrad, Mashinostroenie, 1977. 248 p.

© Матчин И. Е., 2019



УДК 678.073

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭФИРКЕТОНА В КАЧЕСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

О. В. Окшина<sup>1,2\*</sup>, В. Д. Ворончихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: k020381@mail.ru

*Представлена возможность применения низкомолекулярного полиэфиркетона для модификации бутадиен-нитрильного каучука с целью получения топливо- и агрессивностойких изделий в ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: полиэфиркетон, бутадиен-нитрильный каучук.*

## PROSPECTS FOR THE USE OF LOW-MOLECULAR POLYESTER KETONE AS A TECHNOLOGICAL ADDITIVE FOR ELASTOMER COMPOSITIONS

O. V. Okshina<sup>1,2\*</sup>, V. D. Voronchikhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: k020381@mail.ru

*The paper presents the possibility of using low molecular weight polyetherketone to modify nitrile butadiene rubber in order to obtain fuel and aggressive products.*

*Keywords: polyetherketone, nitrile butadiene rubber.*

В современном мире к различным материалам и получаемым из них изделиям постоянно повышаются требования по эксплуатационным свойствам, обеспечение которых возможно путем подбора сырьевых материалов и технологических параметров производства. Значительное изменение имеющих у материала свойств и придание ему новых характеристик возможно за счет модификации полимеров и (или) введения модифицирующих добавок, которые наряду с эксплуатационными изменяют и технологические свойства, облегчая переработку материала в изделие при снижении производственных затрат [1].

Перспективным направлением создания эластомерных композиционных материалов различного назначения является использование при их изготовлении ароматических полиэфиркетонов, которые являются полукристаллическими полимерами и имеют уникальный эксплуатационный комплекс свойств, сочетающий стойкость к химическим, атмосферным, температурным и механическим воздействиям, низкий уровень гидроскопичности, ультрафиолетовому излучению, электрическим разрядам [2–4].

Совместимость в системе полимер-эластомер обеспечивается параметром растворимости, который зависит от молекулярных характеристик совмещаемых материалов и химического строения их макромолекул [5]. Наличие полярных групп в структуре поли-

эфиркетона обеспечивает его термодинамическую совместимость с полярной матрицей, например, на основе бутадиен-нитрильного или хлоропренового каучука, на уровне, достаточном для получения устойчивой при межоперационном хранении смеси.

Использование низкомолекулярного полиэфиркетона в качестве технологической добавки для эластомерных композиций, например, на основе бутадиен-нитрильного каучука значительно повысить теплостойкость, огнестойкость, а также химическую стойкость данного каучука и равномерно распределить все компоненты по объему смеси. Повышение теплостойкости данного каучука в свою очередь увеличит диапазон эксплуатации изделий из него.

Разработанный композиционный материал предполагается к применению в производстве изделий, которые имеют непосредственный контакт с углеводородами или химически активными веществами, например, уплотнителей, сальников, элементов топливных баков и иных изделий.

### Библиографические ссылки

1. Кочнев А. М., Галибеев С. С. Модификация полимеров. Казань : КГТУ, 2008. 533 с.
2. Сравнительный анализ свойств полиэфиркетонов отечественного и зарубежного производства /

Б. С. Кири́н, К. Р. Кузнецова, Г. Н. Петрова, А. Е. Со-  
рокин // Труды ВИАМ. 2018. № 5. С. 34–43.

3. Ароматические полиэфиркетоны и полиэфирэ-  
фиркетоны как перспективные термостойкие конст-  
рукционные материалы / А. М. Хараев, Р. Ч. Бажева,  
Ф. К. Казанчева и др. // Новые полимерные компози-  
ционные материалы : материалы 2 Всерос. научно-  
практич. конф. Нальчик, 2005. С. 68–72.

4. Саламов А. Х., Микитаев А. К., Беев А. А. По-  
лиэфиркетоны: свойства и применение // Современ-  
ные тенденции развития науки и технологий. 2015.  
№ 8-3. С. 21–25.

5. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М. : На-  
учный мир, 2007. 573 с.

#### References

1. Kochnev A. M., Galibeev S. S. Modifikatsiya  
polimerov. Kazan' : KGTU, 2008. 533 p.

2. Sravnitel'nyy analiz svoystv poliefirfirketonov  
otechestvennogo i zarubezhnogo proizvodstva / B. S. Kirin,  
K. R. Kuznetsova, G. N. Petrova, A. E. Sorokin // Trudy  
VIAM. 2018. № 5. P. 34–43.

3. Aromaticeskije poliefirfirketony i poliefirfirketony  
kak perspektivnye termostoykie konstruktsionnye  
materialy / A. M. Kharaev, R. Ch. Bazheva, F. K. Kazan-  
cheva i dr. // Mater. 2 Vseros. nauchno-praktich. konf.  
“Novye polimernye kompozitsionnye materialy”,  
Nal'chik, 2005. P. 68–72.

4. Salamov A. Kh., Mikitaev A. K., Beev A. A.  
Poliefirfirketony: svoystva i primenenie // Sovremennye  
tendentsii razvitiya nauki i tekhnologiy. 2015. № 8-3.  
P. 21–25.

5. Tager A. A. Fiziko-khimiya polimerov. Moscow,  
Nauchnyy mir, 2007. 573 p.

© Окшина О. В., Ворончихин В. Д., 2019

## РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ УЧАСТКА МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТНОГО СОЕДИНЕНИЯ

С. А. Пикулин, Е. В. Красилова, А. В. Гирн

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*Проведен расчет напряжений в опасном сечении для участка соединения переходника с композитной трубой. Приведен алгоритм расчета и поиска оптимальных размеров конического участка переходника.*

*Ключевые слова: композиционные материалы, опасное сечение, оптимизация.*

## CALCULATION OF OPTIMAL SIZE OF THE PART OF THE METAL-COMPOSITE JOINT

S. A. Pikulin, E. V. Krasilova, A. V. Girn

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*The work contains calculation of stresses in a dangerous section for the part of connection of the adapter with a composite pipe. The algorithm of calculation and search of the optimum sizes of a conical site of the adapter is given.*

*Keywords: composite materials, dangerous section, optimization.*

Соединения являются наиболее ответственными элементами конструкций из композиционного материала (КМ). Создание эффективных конструкций из КМ требует решения задач, связанных с определением их напряженно-деформированного состояния (НДС) на стадии проектирования и последующего анализа возможных форм разрушения [1].

В статье [2] было рассмотрено закрепление металлического переходника в композитной трубе (контур переходника показан пунктиром на рис. 1). Разрушение образца при испытании на растяжение произошло в месте стыка переходника с трубой. Цель статьи – определение оптимальных размеров участка, примыкающего к месту разрушения.

Рассмотрен конический и 2 цилиндрических участка трубы, без участка зацепления. Переходник отброшен и заменен действующей реакцией. Принимается, что нагрузка передается в соединении равномерно и прочность соединения больше либо равна прочности рассматриваемого сечения. Величина напряжения в опасном сечении будет зависеть от следующих размеров: внутренний диаметр трубы, толщина стенки, угол полураствора конуса, длина конусного участка; от технологических факторов: способ и качество намотки, материал и его качество. Качество материала и технология изготовления приняты постоянными. Определяемые размеры, а также схема нагружения показаны на рис. 1.

Расчет проведен для трубы с внутренним диаметром 30 мм и толщиной стенки 1,5 мм, что соответствует размерам испытанного образца. Угол  $\alpha$  изменяется от  $5^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом  $5^\circ$ , а длина  $L$  от 5 до 30 мм с шагом 5 мм.

Проверка на прочность проводилась в программе ANSYS [3] для трубы, рассматриваемой как ортотропное твердое тело. Материалом трубы был выбран однонаправленный стеклопластик со следующими характеристиками:

$$E_x = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}; \quad E_y = E_z = 8 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

$$\mu_{xy} = \mu_{xz} = 0,3; \quad \mu_{yz} = 0,4; \quad G_{xy} = G_{xz} = 5 \cdot 10^9 \text{ Па};$$

$$G_{yz} = 3,8 \cdot 10^9 \text{ Па}; \quad \sigma_{b,x} = 1,7 \cdot 10^9 \text{ Па};$$

$$\sigma_{b,y} = \sigma_{b,z} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ Па}; \quad \rho = 2000 \text{ кг/м}^3.$$

Нагрузка была принята постоянной, равной 10 кН. Фиксировалось значение напряжения в опасном сечении (пример результата расчета представлен на рис. 2). Далее оно сравнивалось с максимально допустимым напряжением в трубе, за которое взято  $\sigma_{b,x} = 1,7 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

Далее был построен график зависимости напряжения в опасном сечении  $\sigma_{o.c.}$  от  $\alpha$  и  $L$ . Следует исключить из рассмотрения области, в которых  $D_2$  оказывается меньше наружного диаметра трубы, так как в этом случае у переходника недостаточно толщины для выполнения канавки для зацепления. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Заштрихованная область соответствует размерам не подходящим по технологии изготовления переходника, не обеспечивающих минимальный диаметр  $D_2$ , равный  $D_1 + 2 \cdot h + 2 \cdot h_n$ , где  $h_n = 1,5 \text{ мм}$  – толщина переходника в месте выполнения канавки для закрепления композитной трубы.

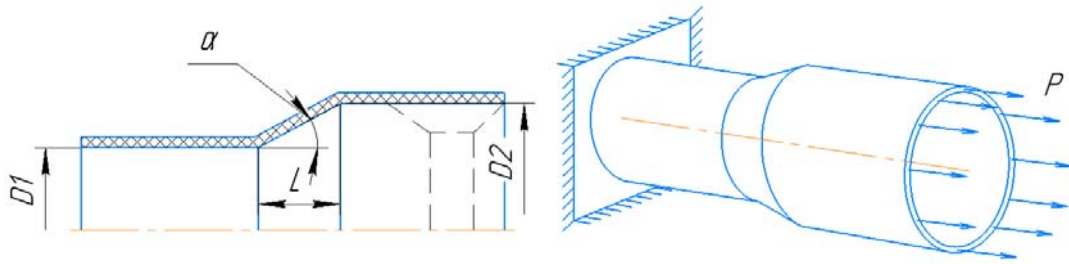


Рис. 1. Расчетная схема

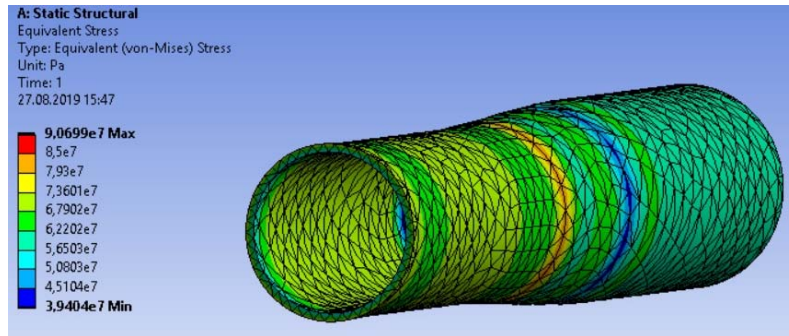


Рис. 2. Распределение напряжений в нагруженной трубе

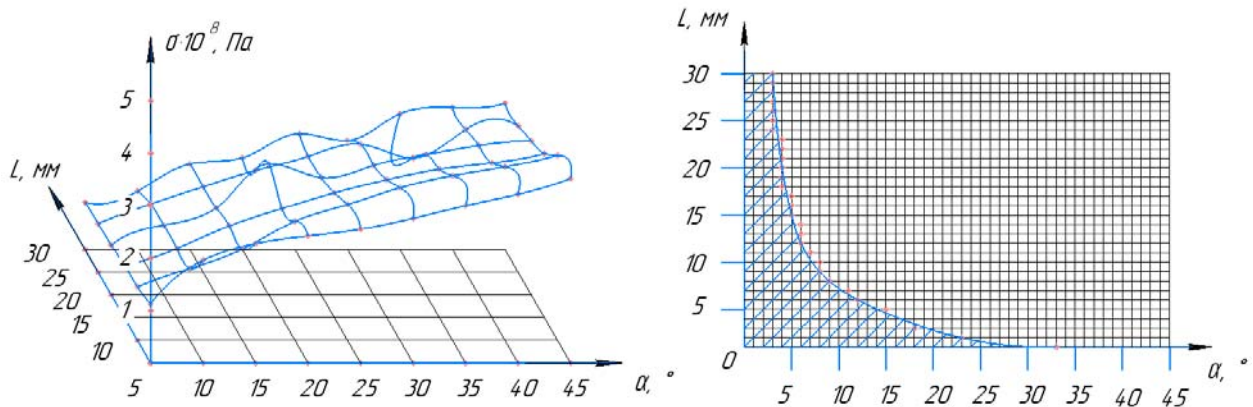


Рис. 3. График  $\sigma_{0.c}(\alpha, L)$  и область допустимых размеров

При рассмотренных размерах и нагрузке напряжения не превышают допустимых. Как видно из графика, с уменьшением угла конусности напряжения падают. Однако величина угла ограничена снизу. Увеличение длины также приводит к их уменьшению, но не столь значительно. В пределах погрешностей, график можно считать плоской поверхностью, что позволяет вывести аналитическую зависимость для определения напряжений в опасном сечении.

Можно сделать следующие расчеты:

- 1)  $D_2 = D_1 + L \cdot \operatorname{tg} \alpha$ , найдем минимум. Для минимального  $D_2$ :  $\alpha = 18^\circ$ ,  $L = 4$  мм;
- 2) минимальная длина, обеспечивающая возможность выполнения канавки,  $L = 2$  мм (при  $\alpha \leq 45^\circ$ );

- 3) масса конической части переходника будет минимальной, если минимальна площадь треугольника, образующегося при ее продольном рассечении:

$$S = \frac{1}{2} L^2 \operatorname{tg} \alpha, \text{ чему соответствуют } \alpha = 35^\circ, L = 2 \text{ мм.}$$

По приведенному выше алгоритму могут быть рассчитаны переходники различных диаметров.

В статье приведен алгоритм выбора оптимальных размеров конической части переходника для композитной трубы. Результаты данной работы могут быть использованы при расчетах закладных элементов для композитных труб, а также при проектировании композитных трубопроводов, имеющих диффузоры и конфузоры.

### Библиографические ссылки

1. Шатров А. К. Проектирование и расчет на прочность соединений деталей из композиционных материалов : учеб. пособие / Краснояр. ин-т косм. техники. Красноярск, 1992. 65 с.

2. Разработка и испытание металлического переходника для труб из композиционного материала [Электронный ресурс] / С. А. Пикулин, Е. В. Красилова, М. И. Смирнова [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы XV междунар. науч.-практ. конф. творческой молодежи (8–12 апреля 2019 г., Красноярск) : в 3 т. Т. 1. / под общ.ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2019.

3. Иванов Д. В., Доль А. В. Введение в Ansys Workbench : учеб. пособие. Саратов : Амирит, 2016. 56 с.

### References

1. Shatrov A. K. *Proektirovanie i raschet na prochnost' soedinenij detalej iz kompozicionnyh*

*materialov* [Design and calculation of the strength of the joints of parts made of composite materials]. Krasnoyarsk, Krasnoyarskij institut kosmicheskoy tekhniki Publ., 1992, 65 p.

2. Pikulin S. A., Krasilova E. V., Smirnova M. I. Rudenko M. S., Girn A. V. [Designing and testing of the metal adapter for the pipe made of composite material]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki : tezisy XV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoj molodezhi (8–12 aprelya 2019 g., Krasnoyarsk) : v 3 t. Pod obshch.red. Yu. Yu. Loginova* [Actual problems of aviation and astronautics: proc. XV international scientific and practical conference of creative youth (8–12 April 2019, Krasnoyarsk): in 3 T. Ed. Yu. Loginov]. Krasnoyarsk, 2019 (In Russ.).

3. Ivanov D. V., Dol' A. V. *Vvedenie v Ansys Workbench* [Introduction to Ansys Workbench]. Saratov, Amirit Publ., 2016. 56 p.

© Пикулин С. А., Красилова Е. В., Гирн А. В., 2019

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ДНИЩ С ВАФЕЛЬНЫМ ФОНОМ

И. С. Преда, И. С. Лобастов

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: 3608318@mail.ru

*Приведены основные принципы оптимизации производственного цикла изготовления на машиностроительном предприятии. Приведен конкретный пример сокращения производственного цикла изготовления сферических днищ с вафельным фоном, использующий технологические особенности оборудования последующей обработки.*

*Ключевые слова: оптимизация цикла, вафельный фон, сферические днища.*

## TECHNOLOGICAL OPTIMIZATION OF CYCLES OF MANUFACTURING OF SPHERICAL HEADS WITH A WAFFLE BACKGROUND

I. S. Preda, I. S. Lobastov

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: Spi2012@inbox.ru

*The basic principles of optimizing the production cycle of manufacturing at a machine-building enterprise are given. A specific example of reducing the production cycle of manufacturing spherical bottoms with a waffle background is given, using the technological features of the equipment for subsequent processing.*

*Keywords: cycle optimization, waffle background, spherical bottoms.*

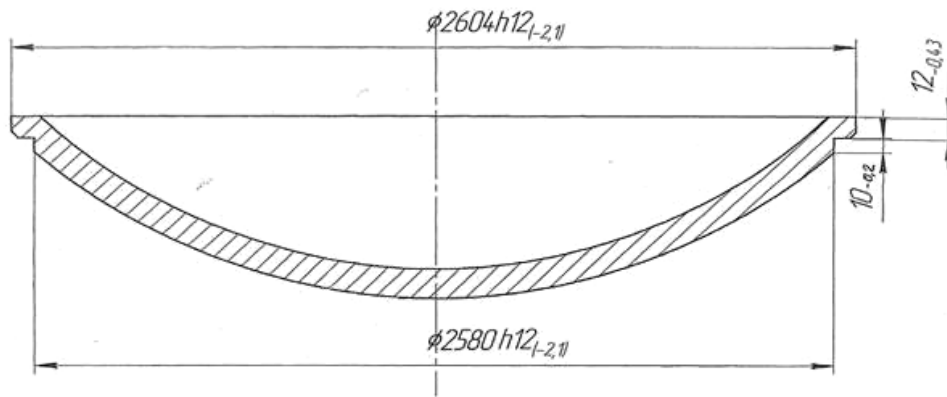
Оптимизация производства означает внедрение инновационных технологий и улучшение трудового процесса. Как правило, подобную модификацию проводят для того, чтобы повысить эффективность работы и снизить расходы предприятия. Оптимизация производства – это ликвидация недочетов предприятия, акцентуация внимания на достоинствах технологии. Она способствует снижению количества управленческих ошибок и недочетов, уменьшению расходов на выпуск продукции, повышению прибыли предприятия и эффективности работы. Кроме этого, оптимизация производства может быть внедрена с целью выхода из финансового кризиса. Ее эффективность станет быстрее и очевиднее, если она будет направлена на основные технологические процессы.

Промышленные компании внедряют те или иные программы повышения эффективности, используя различные методы и формы. Многие достигли успеха в этом процессе: снизили расходы и увеличили прибыль, улучшили качество своего товара, сократили сроки поставок, повысили заинтересованность сотрудников. В силу недостаточно упорядоченных мер оптимизации ряд предприятий получил локальные преимущества [1].

В настоящее время в производственном цехе АО «Красмаш» изготавливаются 4 вида сферических днищ с вафельным фоном, имеющие разные диаметры окончательно изготовленных деталей с технологическими припусками под последующую окончатель-

ную обработку кромок под сварку в составе сборочной единицы. При этом технологические припуски под установку в специальное кольцо, которое впоследствии устанавливается в вертлюг специального обрабатывающего фрезерного станка, имеют одну конфигурацию, но разные типоразмеры. Основной размер, который определяет выбор необходимого установочного специального кольца, это габаритный диаметр (см. рисунок). Еще одним из немаловажных моментов является то, что из-за технических особенностей и производственных мощностей, основное оборудование для токарной обработки габаритного диаметра сферического днища находится в другом подразделении. Таким образом, технологическая цепочка изготовления сферического днища выглядит следующим образом:

- формование сферы в листе-заготовке;
- токарная обработка излишков после формовки и выполнение специального технологического элемента под установку в специальное кольцо для фрезерной обработки (смежное подразделение);
- фрезерная обработка, выполнение вафельного фона;
- окончательная токарная обработка товарной детали перед комплектацией в сборочную единицу (смежное подразделение);
- окончательная сдача размеров, упаковка, передача для комплектации в сборочную единицу.



Единая конфигурация технологического припуска для всех сферических днищ

Проведя оценку производственного цикла, было принято решение изменить конфигурацию технологического припуска на сферических днищах под установку в специальное кольцо для дальнейшего фрезерования, и привести конструкторскую документацию к единому элементу, который впоследствии сократил производственный цикл изготовления на 8 рабочих смен.

Исходя из реализованных мероприятий производственный цикл изготовления выглядит следующим образом:

- формование сферы в листе-заготовке;
- токарная обработка излишков после формовки и выполнение специального технологического элемента под установку в специальное кольцо для фрезерной обработки (смежное подразделение);

- фрезерная обработка, выполнение вафельного фона;
- окончательная сдача размеров, упаковка, передача для комплектации в сборочную единицу.

#### Библиографическая ссылка

1. Уварова Г. А. Оптимизация производства: проблемы и подходы // Ваш партнер консультант. 2015. № 18.

#### Reference

1. Uvarova G. A. Optimizatsiya proizvodstva: problemy i podkhody // Vash partner konsul'tant. 2015. № 18.

© Преда И. С., Лобастов И. С., 2019

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МОЛИБДЕНОВЫХ СПЛАВОВ

Д. И. Савин, И. О. Якубович

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: 3608318@mail.ru

*Рассмотрены особенности процесса обработки деталей из молибденовых сплавов. Особое внимание уделено свойствам обрабатываемого материала. Отмечено, что возникает необходимость применения финишной обработки для получения требуемого качества обрабатываемых поверхностей.*

*Ключевые слова: токарная обработка, шероховатость поверхности, молибденовые сплавы.*

## MACHINING FEATURES OF MOLYBDENUM PARTS

D. I. Savin, I. O. Yakubovich

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: 3608318@mail.ru

*Review machining features of molybdenum parts. Special attention is paid to properties of the processed material. Noted that is needed to use abrasive flow machining to obtain the required quality of surface.*

*Keywords: turning, roughness of surface, molybdenum alloys.*

Для совершенствования процесса развития ракетно-космической техники (РКТ) появилась необходимость в применении прогрессивных жаропрочных материалов. Такими материалами являются молибденовые сплавы. Вместе с тем в производстве ракетной техники существует постоянная тенденция к созданию и использованию более легких деталей более сложной формы. Но применение таких материалов сопровождается рядом физико-химических особенностей. Так после различных видов механической и термической обработки появляется измененный поверхностный слой и внутренние напряжения.

Возникает необходимость удаления измененного слоя и улучшения качества поверхностного слоя. Применение операций шлифования ограничено отсутствием отработанных технологий и фасонным профилем внутренних поверхностей таких деталей.

Молибденовые сплавы на сегодняшний день в производстве РКТ занимают очень весомую роль. Это вызвано отличительными физическими, химическими и другими особенностями материалов.

Молибден является весьма ценным компонентом жаропрочных сплавов, кроме того, сам используется для создания сплавов на его основе. Высокая температура плавления и хорошие механические свойства делают эти сплавы весьма перспективными. Большое влияние на механические свойства молибдена оказывает содержание в нем кислорода, азота и углерода. Наиболее сильное влияние на повышение температуры перехода молибдена из хрупкого состояния в пластичное оказывает кислород, тысячные доли процента

которого, приводят к тому, что молибден становится хрупким при комнатной температуре [1].

При токарной обработке молибдена возникает ряд проблем. Одной из проблем является выделение в зоне резания большого количества тепла, а так же за счет крупнозернистой структуры материала происходят сколы и расслоение обрабатываемой поверхности заготовки. Как следствие, возникает следующая проблема – быстрый износ инструмента, в результате которого происходит отклонение от требуемых линейных размеров. Частая переточка инструмента при обработке молибдена пагубно влияют на стойкость резца, что в свою очередь отражается на формообразовании стружки. При токарной обработке формируется стружка надлома, такая стружка не удаляется из зоны резания и отрицательно влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности [1].

Обрабатываемость молибдена резанием, определяется также способом получения заготовки: молибден, получаемый плавкой, несмотря на то что он плотнее порошкообразного молибдена, получаемого спеканием, лучше поддается обработке резанием. Это обусловлено меньшим растрескиванием материала, лучшей шероховатостью поверхности. При резании молибдена применяют оптимальные величины скоростей; использование невысоких скоростей резания ведет к увеличению шероховатости поверхности, высоких – к интенсивному износу инструмента. Особенности обработки молибдена, как уже отмечалось, связаны с образованием мелкой крошки, затрудняющей получение поверхности требуемой чистоты [1].



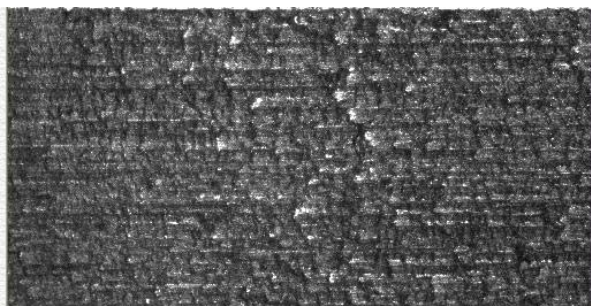


Рис. 1. Шероховатость поверхности при обработке пластиной CNMG 120404MS



Рис. 2. Шероховатость поверхности при обработке пластиной CNMG 120404-EM

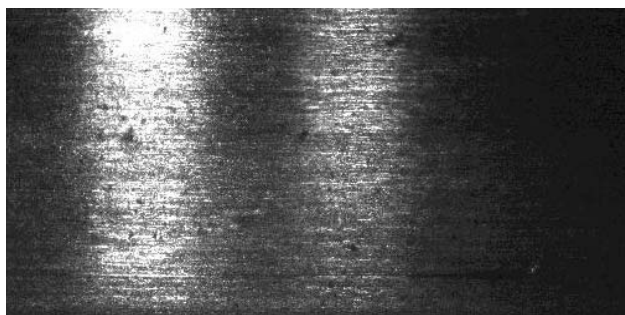


Рис. 3. Шероховатость поверхности при обработке пластиной VCGT 160408-AZ

Была проведена отработка режимов резания на токарном станке с ЧПУ твердосплавными пластинами различных марок наружного контура образца из молибденового сплава марки М-МП ГОСТ 17432–72 диаметром 100 мм для получения шероховатости поверхности  $R_a = 1,6$  мкм.

При обработке пластиной CNMG 120404MS из твердого сплава марки KCU25 со скоростью вращения 150 об/мин, глубиной резания 0,15 мм и подачей 0,1 мм/об. шероховатость поверхности составила  $R_a = 1,82$  мкм и стойкость одной режущей грани данной пластины составила 5 мин, что является низким показателем, в связи с особенностями микроструктуры молибденового сплава данной марки, и образованием мелкой крошки перед режущей кромкой (рис. 1).

При обработке пластиной CNMG 120404-EM из твердого сплава марки YBG 202 со скоростью

вращения 200 об/мин, глубиной резания 0,15 мм и подачей 0,1 мм/об. шероховатость поверхности составила  $R_a = 1,74$  мкм, стойкость одной режущей грани данной пластины составила 20 мин, что удовлетворяет требованиям по шероховатости (рис. 2).

При обработке пластиной VCGT 160408-AZ из твердого сплава марки NT10 со скоростью вращения 500 об/мин, глубиной резания 0,15 мм и подачей 0,15 мм/об. шероховатость поверхности составила  $R_a = 1,6$  мкм, стойкость одной режущей грани данной пластины составила 20 мин, что удовлетворяет требованиям по шероховатости (рис. 3).

В результате проведенной обработки установлен тип пластины и рекомендуемые режимы резания для получения требуемой шероховатости поверхности, но стойкость режущего инструмента остается также недостаточной, в связи с наличием дефектного поверх-

ностного слоя и особенностями микроструктуры порошкового молибдена.

Для уменьшения величины дефектного поверхностного слоя деталей применяют нетрадиционные методы финишной обработки, в которых в качестве режущего инструмента применяется абразивный поток рабочей среды, способный повторять форму обрабатываемой поверхности. Сравнительный анализ различных методов финишной обработки показывает, что для ряда деталей способ обработки абразивным потоком, основанный на течении под давлением вдоль обрабатываемой поверхности вязкоупругой, наполненной абразивом рабочей среды, является предпочтительным [2].

Такой процесс позволит сократить расход режущего инструмента для получения требуемой шероховатости поверхности. Однако процесс финишной обработки абразивным потоком сплавов на основе является мало изученным и необходимы исследования этого процесса.

#### Библиографические ссылки

1. Коль В. Технология материалов для электровакуумных приборов : пер. с англ. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1952. 448 с.
2. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко, М. А. Лубнин, С. К. Сысоев и др. // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4. С. 173–178.

#### References

1. Kol' V. Tekhnologiya materialov dlya elektrovakuumnykh priborov : per. s angl. M. ; L. : Gosenergoizdat, 1952. 448 p.
2. Metodika otsenki tochnosti, kachestva i effektivnosti abrazivno-ekstruzionnoy obrabotki detaley / V. A. Levko, M. A. Lubnin, S. K. Sysoev et al. // Vestnik SibGAU. 2011. Vol. 4. P. 173–178.

© Савин Д. И., Якубович И. О., 2019

УДК 621.45

## ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В. М. Самошкин

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: ivov-chik-91@mail.ru

*Рассматриваются особенности оперативного контроля стабильности параметров ракетно-космической техники в условиях серийного производства.*

*Ключевые слова: качество, надежность, стабильность, оперативный контроль стабильности, контрольные карты, медиана.*

## FEATURES OF OPERATIONAL STABILITY CONTROL OF PARAMETERS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

V. M. Samoshkin

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: ivov-chik-91@mail.ru

*The article discusses the features of operational stability control of parameters of rocket and space technology of serial production are considered.*

*Keywords: quality, reliability, stability, operational stability control, control cards, median.*

Создание ракетно-космической техники с высокими показателями качества и надежности является актуальной научно-технической задачей отечественного ракетно- и двигателестроения. Достижение этих целей невозможно без создания оптимальных производственных условий, направленных на совершенствование технологических процессов и системы контроля на предприятиях-изготовителях изделий РКТ. Особый интерес в данных условиях вызывает контроль стабильности качества изготовления изделий, который сегодня не мыслим без использования статистических методов [1].

Статистические методы хорошо зарекомендовали себя как инструменты качества и применяются в случаях, когда по результатам ограниченного числа наблюдений требуется установить причины улучшения или ухудшения точности и стабильности технологических процессов или работы технологического оборудования [2].

Под стабильностью качества изготовления продукции понимают свойство технологического процесса обеспечивать (сохранять) показатели качества (параметры) изготавливаемых изделий в заданных пределах в течение определенного промежутка времени [3]. В свою очередь обеспечение стабильности и точности производственного процесса оказывает влияние на качество готовой продукции.

К современным изделиям РКТ предъявляются высокие требования по надежности, характеризующиеся показателями качества изготовления, кото-

рые задаются в виде параметров, подлежащих контролю стабильности на стадии серийного производства. Для достижения требуемой надежности необходимо иметь высокую точность и стабильность параметров изделий РКТ [4].

Основной целью контроля стабильности качества изготовления изделий является выявление тенденций к появлению разладок производственного процесса с помощью статистических методов и критериев, когда значения показателя качества изготовления изделий ещё находятся в заданных пределах [5].

Одним из видов контроля стабильности по количественному признаку является оперативный контроль. Оперативный контроль предназначен для выявления внезапных изменений статистических характеристик параметров изделий и осуществляется непрерывно в процессе изготовления ДСЕ-изделий. При оперативном контроле решение о стабильности принимается по результатам проверок нескольких отдельных единиц или выборок (групп) изделий. Оперативный контроль проводится, когда характер производства позволяет расположить значения контролируемого параметра в хронологической последовательности изготовления.

Оперативный контроль проводится с применением контрольных карт методом медиан и индивидуальных значений.

Расчёт границ регулирования с учётом возможного различия в задании требований к параметрам проводится в соответствии с таблицей.

## Определение границ регулирования

Вид задания параметра	Пределы допуска	Границы регулирования для медиан	Границы регулирования для полуразмахов
$X_n \pm \delta$	$T_v = X_n + \delta$ $T_n = X_n - \delta$	$R_v = T_v - 0,2 \cdot T$ $R_n = T_n + 0,2 \cdot T$	$R_{vr} = T_v - 0,09 \cdot T$ $R_{nr} = T_n + 0,09 \cdot T$
$\delta 2^{\pm \delta_1}$	$T_v = X_n + \delta_1$ $T_n = X_n - \delta_2$		
$X_n + \delta$	$T_v = X_n + \delta$ $T_n = X_n$		
$X_n - \delta$	$T_v = X_n$ $T_n = X_n - \delta$		
В пределах $X_a - X_b$	$T_v = X_a$ $T_n = X_b$		
Не более $X_a$	$T_v = X_a$ $T_n, \text{ усл.} = \bar{X}_{\min}$	$R_v = T_v - 0,2 \cdot T_{\text{усл.}}$ $R_n - \text{отсутствует}$	$R_{vr} = T_v - 0,09 \cdot T_{\text{усл.}}$ $R_{nr} - \text{отсутствует}$
Не менее $X_b$	$T_v, \text{ усл.} = \bar{X}_{\max}$ $T_n = X_b$	$R_v - \text{отсутствует}$ $R_n = T_n + 0,2 \cdot T_{\text{усл.}}$	$R_{vr} - \text{отсутствует}$ $R_{nr} = T_n + 0,09 \cdot T_{\text{усл.}}$

В таблице приняты следующие сокращения:

$T = T_v - T_n$  – поле допуска параметра;

$X_n$  – номинальное значение параметра;

$X_a, X_b$  – предельные значения параметра;

$\delta$  – допустимое предельное (верхнее, нижнее) отклонение параметра от номинального значения;

$T_n, \text{ усл.}$  – условный нижний предел допуска;

$T_v, \text{ усл.}$  – условный верхний предел допуска;

$T_{\text{усл.}}$  – условный допуск;

$T_{\text{усл.}} = T_v, \text{ усл.} - X_b$  – при задании параметра «не менее...»;

$T_{\text{усл.}} = X_a - T_n, \text{ усл.}$  – при задании параметра «не более...»;

$\bar{X}_{\min}$  – среднее арифметическое минимальных значений параметра в группах за этап;

$\bar{X}_{\max}$  – среднее арифметическое максимальных значений параметра в группах за этап.

Условные пределы поля допуска необходимы только для вычисления границ регулирования и на контрольную карту не наносятся.

На сетке контрольной карты наносятся линии верхнего ( $T_v$ ) и нижнего ( $T_n$ ) пределов допуска на параметр с ординатами, соответствующими максимальному и минимальному значениям параметра по КД, а также линии верхней и нижней рассчитанных границ регулирования значений параметра для медиан ( $R_v, R_n$ ), для полуразмахов ( $R_{vr}, R_{nr}$ ).

Статистическими характеристиками являются медианы и индивидуальные значения выборок. Медианы выборок содержат информацию об уровне настроенности процесса, а положение индивидуальных значений относительно границ регулирования – о точности процесса.

При ведении оперативного контроля в таблицу контрольной карты заносятся значения параметра строго в хронологической последовательности изготовления изделий и располагаются в виде столбцов. Каждый столбец образует группу, объём которой равен пяти значениям параметра. Этап включает восемь групп. На сетке контрольной карты значения пара-

метра отмечаются точками на ординате напротив соответствующего столбца таблицы. После нанесения каждой пятой точки определяется медиана группы значений. Третья точка в группе на сетке, считая от наибольшей или наименьшей по значению, является медианой. Медианы соединяются между собой линией, которая отражает динамику изменения уровня настройки процесса.

Критерием удовлетворительности хода процесса при оперативном контроле является нахождение медиан в пределах границ регулирования  $R_v$  и  $R_n$  и крайних значений групп в пределах границ регулирования полуразмахов  $R_{vr}$  и  $R_{nr}$ .

Предупреждающими сигналами о появляющейся нестабильности процесса следует считать либо выход не менее четырёх последовательных точек медиан за границы регулирования  $R_v, R_n$ , либо выход крайних значений параметра не менее, чем в четырёх последовательных группах за границы регулирования  $R_{vr}, R_{nr}$ .

В процессе изготовления РКТ, где заложены повышенные требования к надежности применение данного вида контроля стабильности качества (оперативный контроль) может прогнозировать работу изделий в процессе испытаний и эксплуатации.

## Библиографические ссылки

1. Карпов Л. И., Литвинов В. Г., Яворский В. А. Инженерные методы оценки и контроля качества в серийном производстве. М. : Изд-во стандартов, 1984. 216 с.
2. Статистические методы контроля качества продукции : пер. с англ. / Л. Ноулер и др. 2-е рус. изд. М. : Изд-во стандартов, 1989.
3. Лумельский Я. П. Статистические оценки результатов контроля качества. М. : Изд-во стандартов, 1979. 200 с.
4. Испытание и обеспечение надежности : учебник / А. И. Коломенцев, М. В. Краев, В. П. Назаров и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2006. 336 с.

5. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М. : Наука, 1968. 288 с.

#### References

1. Karpov L. I., Litvinov V. G., Yavorskiy V. A. Inzhenernye metody otsenki i kontrolya kachestva v seriynom proizvodstve. Moscow, Publishing House of Standards, 1984, 216 p.

2. Statisticheskie metody kontrolya kachestva produktsii / L. Nouler et al. ; per. s angl. 2-e rus. izd. Moscow, Publishing House of Standards, 1989.

3. Lumel'skiy Ya. P. Statisticheskie otsenki rezul'tatov kontrolya kachestva. Moscow, Publishing House of Standards, 1979, 200 p.

4. Ispytanie i obespechenie nadezhnosti : ucheb. / A. I. Kolomentsev, M. V. Kraev, V. P. Nazarov et al. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t ; Mosk. aviats. in-t. Krasnoyarsk, 2006. 336 p.

5. Pustyl'nik E. I. Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniya. Moscow, Nauka, 1968. 288 p.

© Самошкин В. М., 2019

## ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МАГИСТРАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ

П. Ю. Самошкина

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: polchik91@mail.ru

*Производство и испытание элементов магистралей трубопроводов является ответственным этапом производства изделий ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: технология производства ракетостроения, испытания, приспособления для испытаний, трубопроводы, топливные магистрали.*

## FEATURES OF TESTING ELEMENTS OF PIPELINES

P. Y. Samoshkina

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: polchik91@mail.ru

*Production and testing of elements of pipelines is a critical stage in the production of rocket and space technology product.*

*Keywords: rocket science, tests, devices for tests, pipeline, fuel lines.*

С целью обеспечения качества и надежности изделий ракетно-космической техники необходимо проверить надежность элементов и систем двигателей. Одним из важных этапов проверки качества деталей и узлов является проведение испытаний [1].

Многие узлы изделий ракетно-космической техники работают под высоким давлением, также не допускается утечка жидкостей и газов из систем [2]. Для исключения брака и дефектов, в условиях производства проводят испытания на прочность и герметичность.

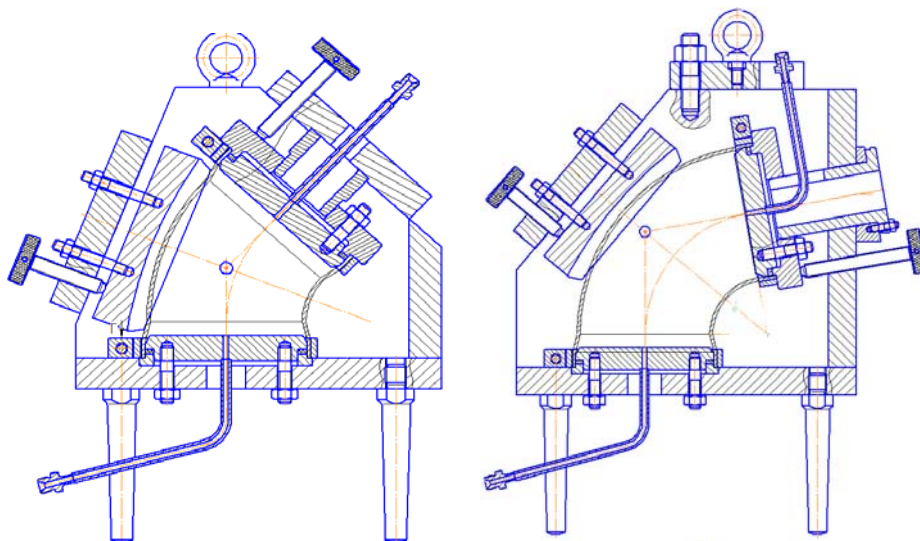
Испытания на герметичность производятся с целью обнаружения дефектов изделия, через которые могут проникать газы, пары или жидкости [3].

По трубопроводам компоненты топлива подаются к жидкостному ракетному двигателю. Тоннельные трубы служат для надежной изоляции одного компонента топлива от другого и повышения надежности ракеты при хранении в заправленном состоянии и в условиях полета. Расходные трубопроводы из верхних баков могут проходить к двигательной установке по наружной поверхности нижнего бака или внутри объема нижнего бака. В последнем случае, как правило, расходный трубопровод монтируется внутри специальной коаксиально установленного туннельного трубопровода. Необходимость этого объясняется одной из главных причин, если используются самовоспламеняющиеся компоненты, то в случае даже микроскопических течей компонента через поры может начаться взрывная реакция и произойти разрушение ракеты [4; 5].

При работе жидкостного ракетного двигателя возникают сильные вибрации трубопроводов, по которым проходят компоненты топлива. Для исключения разрушения магистралей трубопроводов и всей ракеты в целом, разработчиком предусмотрены специальные сильфонные компенсаторы, которые встраиваются в конструкцию магистралей. Также проведение испытаний требуется для колен трубопроводов, которые изготавливаются из двух половин штампованных листов, в некоторых случаях разработчиком не были предусмотрены технологические бурты.

Сложности при испытаниях подобных элементов трубопроводов возникают из-за невозможности закрепить специальную технологическую испытательную оснастку. В таком случае возникает необходимость в проектировании крупногабаритного приспособления. Испытания на прочность и герметичность колена трубопровода проходят при внутреннем подаваемом давлении  $30 \text{ кг/см}^2$ . Нагрузка, действующая на каждый фланец приспособления при таком давлении около  $4000 \text{ кг/см}^2$ .

Условия проведения испытаний делают невозможным проектирование и использование типовых конструкций приспособлений типа «фланец – полухомуты». Для того чтобы обеспечить надежные и достоверные испытания на прочность и герметичность было принято решение проектировать силовые подставки в одном случае со съемной планкой, а во втором с центрирующей втулкой, расположенной под углом к поверхности сварной подставки и перпендикулярной к торцу изделия (см. рисунок).



Схемы приспособлений для испытаний колена трубопровода при разном угле изгиба

Чтобы избежать прогиба изделия при нагрузке давлением, слева предусмотрен упор с трапецидальным профилем с резиновой прокладкой, который удерживает изделие в двух точках касания. Для обеспечения герметизации и снижения уровня нагрузки на оснастку выбран способ герметизации «на разжим» с обоих торцов изделия.

Подставка для испытаний испытывает большие нагрузки и работает «на излом». Все плиты перед сваркой должны пройти механическую обработку, выполнение разделки под сварку является обязательным условием для выполнения силовых швов, обеспечивающих надежную силовую конструкцию.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что не всегда простая конструкция изделия обеспечивает простой подход к испытаниям на прочность и герметичность. Большие сложности представляет отсутствие технологических буртов в изделии. Подобные проблемы можно исключить на этапе проектирования и проработки конструкторской документации. У разработчика должно быть полное понимание того, как будет изготавливаться конструкция и, если обязательно проведение испытаний, то как эти испытания возможно провести. Проблема нетехнологичности сейчас очень актуальна на фоне освоения нового изделия.

#### Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. М. : Машиностроение, 1989.
2. Вдовенко В. Г., Колмаков Л. В. Вакуумные технологии в производстве ракетно-космической техники // Технология машиностроения : обзорно-анали-

тический, научно-технический и производственный журнал. 2002. № 4 (16).

3. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

4. Воробей В. В., Логинов В. Е.. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. М. : Изд-во МАИ, 2001.

5. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1986.

#### References

1. Konstruktsiya i proektirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley / G. G. Gakhun, V. I. Baulin, V. A. Volodin. Moscow, Mashinostroenie, 1989.
2. Vdovenko V. G., Kolmakov L. V. Vakuumnye tekhnologii v proizvodstve raketno-kosmicheskoy tekhniki // Obzorno-analiticheskiy, nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyy zhurnal "Tekhnologiya mashinostroeniya". 2002. № 4 (16).
3. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A., Filimonov A. S. Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2008.
4. Vorobey V. V., Loginov V. E. Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley. Moscow, Izd-vo MAI, 2001.
5. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley. Moscow, Mashinostroenie, 1986.

© Самошкина П. Ю., 2019

УДК 621.792.053

## ИССЛЕДОВАНИЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ КАУЧУКОВ В КАЧЕСТВЕ ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЫ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В. В. Свередюк<sup>1,2\*</sup>, В. Д. Ворончихин<sup>2</sup>, Т. В. Трушкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: svereduk91@gmail.com

*Представлены сведения по полимерным матрицам для применения в клеевых композициях, используемых в авиа- и ракетостроении, которые должны обладать хорошими прочностными показателями, клейкостью, электропроводимостью, коррозионной стойкостью и способностью сохранять эксплуатационные характеристики в течение длительного времени. Показаны наиболее часто применяемые в составе токопроводящих клеевых композиций полимерные матрицы. Исследованы диэлектрические характеристики бутадиен-нитрильных каучуков с целью последующего применения в качестве эластомерной основы токопроводящих клеев.*

*Ключевые слова: полимерная основа, токопроводящий клей, удельное объемное сопротивление, эпоксидная смола, бутадиен-нитрильный каучук.*

## RESEARCH OF BUTADIENE-NITRILE RUBBERS AS A POLYMERIC BASIS FOR CURRENT CONDUCTIVE ADHESIVE COMPOSITIONS

V. V. Sveredyuk<sup>1,2\*</sup>, V. D. Voronchikhin<sup>2</sup>, T. V. Trushkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: svereduk91@gmail.com

*The paper presents information on polymer matrices for use in adhesive compositions, which should have good strength characteristics, adhesiveness, electrical conductivity, corrosion resistance, and the ability to maintain performance for a long time. The most commonly used polymer matrices as part of conductive adhesive compositions are shown. The dielectric characteristics of nitrile butadiene rubbers have been investigated for the purpose of subsequent use of conductive adhesives as an elastomeric base.*

*Keywords: polymer base, conductive adhesive, volume resistivity, epoxy resin, nitrile butadiene rubber.*

В настоящее время широкое применение и распространение в авиа- и ракетостроении нашли бифункциональные токопроводящие клеевые композиции, т. е. необходимые для соединения изделий из различных материалов и снятия статического электричества [1]. При этом наиболее интересными с научной точки зрения и максимально востребованными на практике в авиа- и ракетостроении являются токопроводящие клеи, имеющие в качестве полимерной основы карбоцепные и гетероцепные эластомеры [2].

Олигомеры и полимеры, которые используют в качестве основы токопроводящих клеевых композиций, являются в структурированном (отвержденном) состоянии условными диэлектриками. Имеющийся уровень электропроводящих свойств полимерной основы определяется ее макро- и микроструктурой организацией [3; 4].

Выбор полимерной основы, представленный на рынке для производства токопроводящих клеев, на сегодняшний день очень велик. Наибольшее распро-

странение в качестве полимерной основы токопроводящих клеевых композиций нашли различные виды эпоксидных смол такие, как эпоксидно-диановая смола ЭД-20, модифицированная кремнийорганическим соединением эпоксидная смола в фурилглицидиловом эфире СЭДМ-3Р, полифункциональные эпоксидные смолы, низкомолекулярные эпоксидные смолы, диановые эпоксидные смолы, модифицированные диглицидиловыми эфирами гомоолигомера эпихлоргидрина и (или) 1,4-бутандиола [5; 6].

Широкое применение при производстве токопроводящих клеевых композиций нашли такие полимерные матрицы, как тиокол НВБ-2, пленкообразующий сополимер метакриламида, бутилметакрилата и акрилонитрила, фенолформальдегидные смолы различных марок, смесь полиэтиленового воска и парафина в различных соотношениях, фторполимер Ф-42, бутадиен-нитрильный каучук, хлоропреновый каучук или их смеси, смеси бутадиен-нитрильного каучука и бутадиен-стирольного термоэластопласта в сочетании с различными целевыми добавками [5; 6].



Токопроводящий клей должен удовлетворять многим требованиям хорошими прочностными показателями, клейкостью, коррозионнотойкостью, низким удельным объемным сопротивлением, сохранять свои токопроводящие и прочностные свойства в течение длительного времени, иметь отечественную сырьевую базу и невысокую рыночную стоимость. Все перечисленные факторы удовлетворяются при применении эластомеров в качестве полимерные основы клеевых композиций [1; 2].

Эластомеры по своей природе относятся к условно диэлектрическим материалам, так как наличие в макромолекулах гетероатомов, циклических структур и иных элементов молекулярной неоднородности способствует электрической проводимости [4].

Одним из полимеров, активно используемых при создании клеевых композиций различного назначения, является бутадиен-нитрильный каучук. Наличие в акрилонитрильном фрагменте полимера неподеленной электронной пары у атома азота обуславливает возможность образования водородных и иных связей с активными центрами склеиваемых поверхностей, а также достаточный уровень когезионной прочности за счет внутри- и межмолекулярного взаимодействия [7]. Наличие неподеленной электронной пары у атома азота приводит к поляризации макромолекулы и, как следствие, к появлению проводимости в матрице каучука.

Наличие собственной проводимости в сочетании с наличием отечественных производителей (АО «Красноярский завод синтетического каучука», ФГУП «Воронежский филиал Научно-исследовательского института синтетического каучука имени академика С. В. Лебедева») определяет бутадиен-нитрильные каучуки как наиболее ценную полимерную основу для токопроводящих эластомерных клеевых композиций.

Для установления уровня электрической проводимости бутадиен-нитрильных каучуков были изучены марки каучука типа БНКС, отличающиеся содержанием нитрилакриловой кислоты и молекулярными характеристиками. С учетом проведенных ранее предварительных испытаний [8] установлен характер изменения удельного объемного электрического сопротивления пленок в зависимости от содержания нитрила акриловой кислоты в составе полимера. Изучено влияние полярности полимера и его упругих свойств на диэлектрические характеристики в режиме статического нагружения при разной степени деформации образцов.

Полученные данные будут использованы при разработке составов токопроводящих клеевых композиций и покрытий, используемых для снятия статического напряжения.

#### Библиографические ссылки

1. Кардашов Д. А., Петрова А. П. Полимерные клеи. М. : Химия, 1983. 256 с.
2. Свередюк В. В., Ворончихин В. Д. Основные принципы создания углеродсодержащих токопроводящих клеевых композиций // Решетневские чтения :

материалы XXII Международной науч.-практ. конф. (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018. С. 95–96.

3. Гуль В. Е., Шенфиль Л. З. Электропроводящие полимерные композиции. М. : Химия, 1984. 240 с.

4. Сажин Б. И. Электрические свойства полимера. Л. : Химия, 1977. 192 с.

5. Базарова Ф. Ф., Колесова Л. С. Клеи в производстве радиоэлектронной аппаратуры. М. : Энергия, 1975. 72 с.

6. Щеглов П. А., Исаев В. Г. Результаты испытаний токопроводящих клеев с углеродными наполнителями // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона : сб. ст. по материалам участников VII Ежегодной науч. конф. аспирантов «МГОТУ», 2016. 692 с.

7. Бутадиен-нитрильные каучуки, синтез и свойства / В. Н. Папков, Ю. К. Гусев, Э. М. Ривин, Е. В. Блинов. Воронеж : ВГУИТ, 2014. 218 с.

8. Свередюк В. В., Ворончихин В. Д. Исследование диэлектрических характеристик эластомерной основы токопроводящих клеев и покрытий // Резиновая промышленность: сырье, материалы, технология : сб. материалов XXIII Междунар. науч.-практ. конф. М. : ООО «НИЦ НИИШП», 2019. С. 137–138.

#### References

1. Kardashov D. A., Petrova A. P. Polimernye klei. Moscow, Himiya, 1983. 256 p.

2. Sveredyuk V. V., Voronchihin V. D. Osnovnye principy sozdaniya uglerodsoderzhashchih tokoprovodyashchih kleevykh kompozitsij // Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Krasnoyarsk, 2018. Ch. 1. P. 95–96.

3. Gul' V. E., Shenfil' L. Z. Elektroprovodyashchie polimernye kompozitsii. Moscow, Himiya, 1984. 240 p.

4. Sazhin B. I. Elektricheskie svoystva polimera. Leningrad, Himiya, 1977. 192 p.

5. Bazarova F. F., Kolesova L. S. Klei v proizvodstve radioelektronnoy apparatury. Moscow, Energiya, 1975. 72 p.

6. Shcheglov P. A., Isaev V. G. Rezul'taty ispytaniy tokoprovodyashchih kleev s uglerodnymi napolnitelyami // Innovacionnye aspekty social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona : sbornik statej po materialam uchastnikov VII Ezhegodnoj nauchnoj konferencii aspirantov "MGOTU", 2016. 692 p.

7. Papkov V. N., Gusev Yu. K., Rivin E. M., Blinov E. V. Butadien-nitri'l'nye kauchuki, sintez i svoystva. Voronezh, VGUIIT, 2014. 218 p.

8. Sveredyuk V. V., Voronchihin V. D. Issledovanie dielektricheskikh harakteristik elastomernoj osnovy tokoprovodyashchih kleev i pokrytij // Rezinovaya promyshlennost': syr'e, materialy, tekhnologiya : sb. materialov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konf. Moscow, ООО "NIC "NIISHP", 2019. P. 137–138.

© Свередюк В. В., Ворончихин В. Д., Трушкина Т. В., 2019

УДК 620.197.2

## НЕНЕСЕНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Т. В. Трушкина, В. В. Свередюк, И. Б. Широков

АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: tatyana.si@mail.ru.

*При создании образцов РКТ предъявляются требования повышенной надежности, работоспособности. Актуальными становятся вопросы правильности выбора и применения конструкционных материалов, а также неметаллических материалов, которые являются составляющими различного вида покрытий, элементов конструкции, обеспечивающих тактико-технические характеристики изготавливаемых изделий. МФП – многофункциональное покрытие – предназначено для кратковременной защиты наружных поверхностей летательных аппаратов от аэродинамических и других видов нагрева, а также от действия поражающих факторов ядерного взрыва. Разработка технологии нанесения многофункционального теплозащитного покрытия (МФП) автоматизированным методом на поверхности изделий ракетной техники является, несомненно, актуальной задачей.*

*Ключевые слова: теплозащитные покрытия, многофункциональное покрытие, автоматизированный метод.*

## APPLICATION OF A MULTIFUNCTIONAL HEAT-SHIELDING COATING BY AN AUTOMATED METHOD

T. V. Trushkina, V. V. Sveredyuk, I. B. Shirokov

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: tatyana.si@mail.ru.

*When creating samples of RCT, requirements for increased reliability and availability are imposed. The issues of the correct choice and application of structural materials, as well as non-metallic materials, which are components of various types of coatings, structural elements that provide the tactical and technical characteristics of manufactured products, are becoming relevant. MFP – a multifunctional coating designed for short-term protection of the outer surfaces of aircraft from aerodynamic and other types of heating, as well as from the effects of damaging factors of a nuclear explosion. The development of a technology for applying a multifunctional heat-protective coating (MFP) by an automated method on the surface of rocketry products is undoubtedly an urgent task.*

*Keywords: heat-protective coatings, multifunctional coating, automated method.*

Современные изделия ракетной техники должны полностью соответствовать основным требованиям, включающим надежность, низкий вес, высокие эксплуатационные свойства, экономичность и ресурс [1]. Данные требования обеспечиваются благодаря использованию новых материалов и способов их обработки, включая технологии упрочнения и нанесения покрытий в дополнение к совершенствованию конструкции и достижениям в аэро- и термодинамике. При создании образцов РКТ, к которым предъявляются требования по повышенной надежности, работоспособности особенно актуальными становятся вопросы правильности выбора и применения конструкционных материалов, а также не металлических материалов, которые являются составляющими различного вида покрытий, элементов конструкции, обеспечивающих тактико-технические характеристики изготавливаемых изделий. МФП – многофункциональное покрытие

предназначено для кратковременной защиты наружных поверхностей летательных аппаратов от аэродинамических и других видов нагрева, а также от действия поражающих факторов ядерного взрыва. МФП является своеобразным пакетом покрытий, состоящим из слоев специальных подготовительных слоев и основных это стивлон и термосил. Разработка технологии нанесения многофункционального теплозащитного покрытия (МФП) автоматизированным методом на поверхности изделий ракетной техники является, несомненно, актуальной задачей.

Технология нанесения МФП ручным методом разработана и не представляет сложности, в то время как технология автоматизированного нанесения МФП является инновационной, не реализована ни одним предприятием в России. Автоматизированный метод нанесения МФП позволяет сократить расход материалов, время нанесения, обеспечивает получение

качественного покрытия на изделия. Окрасочно-сушильная камера автоматизированного типа оснащена роботами Кука, которые выполняют распыление компонентов покрытия, через форсунки. Также возможно проведение операций контроля толщины слоев при помощи лазерных датчиков. Работа комплекса осуществляется оператором с помощью управляющих программ.

В настоящее время проводятся экспериментальные исследования, в части отработки режимов нанесения покрытия, ведется набор статистики. Сформированный массив данных [2] в последующем будет обработан для определения технологических режимов нанесения покрытия с характеристиками, соответствующими требованиям конструкторской документации. В ходе проведения работ установлены зависимости влияния входных параметров на качество получаемого покрытия.

Теоретические представления о нанесении МФП, позволяют сделать вывод, что на получение качественного МФП покрытия будут оказывать влияние управляющие воздействия процесса, такие как скорость движения робота, размер форсунок, расстояние от форсунки до напыляемой поверхности, давление подачи смеси, расстояние от емкости подачи состава до форсунок (длина шланга), перемешивание смеси, соответствие компонентов НТД, срок годности материалов, используемых для приготовления смеси. Для нанесения теплозащитных МФП покрытий разрабо-

тана принципиальная схема процесса. Схемой описывается взаимосвязь входных параметров процесса со свойствами получаемого МФП покрытия и их влияние на качество ТЗП.

На основании проведенных исследований, набранной статистики при достижении стабильности значений требуемых параметров будет разработан технологический процесс нанесения многофункционального покрытия автоматизированным методом.

#### Библиографические ссылки

1. Лебедев В. М., Смирнов Н. А. Работоспособность металлических трибосопряжений узлов трения машин. Красноярск : КПИ, 1990. 140 с.
2. Адлер Ю. П., Марков Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 290 с.

#### References

1. Lebedev V. M., Smirnov N. A. Rabotosposobnost' metallicheskih tribosopryazhenij uzlov treniya mashin. Krasnoyarsk : KPI, 1990. 140 p.
2. Adler Yu. P., Markov E. V., Granovskij Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij. Moscow, Nauka, 1976. 290 p.

© Трушкина Т. В., Свередюк В. В., Широков И. Б., 2019

УДК 621.914

## КОНТРОЛЬ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ В СРЕДЕ «VERICUT» ДЛЯ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ РКТ

М. Н. Цугленок

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: sotjro@mail.ru

*Рассмотрена возможность контроля перемещения узлов станка с числовым программным управлением и предварительная проверка управляющей программы обработки корпусных деталей РКТ.*

*Ключевые слова: управляющая программа, механическая обработка.*

## CONTROL OF THE MANAGEMENT PROGRAM IN THE VERICUT ENVIRONMENT FOR MACHINING CENTERS IN THE PRODUCTION OF RCT PARTS

M. N. Tsuglenok

JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: sotjro@mail.ru

*The possibility of controlling the movement of machine parts with numerical control, and a preliminary check of the control program for processing hull parts of the RCT are considered.*

*Keywords: control program, machining.*

Для изготовления крупногабаритных деталей РКТ применяется специальное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ).

Технологический процесс обязывает выполнять объёмную механическую обработку деталей, что в свою очередь требует больших затрат времени, дорогостоящего материала, затрат предприятия-изготовителя в целом. Так как на станках обрабатываются зачастую не только детали, но и сборочные единицы, ошибки, зарезы и столкновения с деталью узлов станка не допустимы. В связи с этим необходимо произвести предварительную проверку управляющей про-

граммы и движений узлов станка, которые эта программа реализует.

Произвести проверку можно в программе VERICUT – это моделирование обработки на станках с ЧПУ. Программа моделирует движение инструмента и процесс удаления материала, выявляются ошибки или области неэффективности в программах ЧПУ. Для проверки необходимо создать проект в VERICUT, используя реальные данные станка, пределы движения по осям, геометрические параметры стола, шпинделя, оснастки, разработать 3D-модель детали и приспособления (рис. 1).

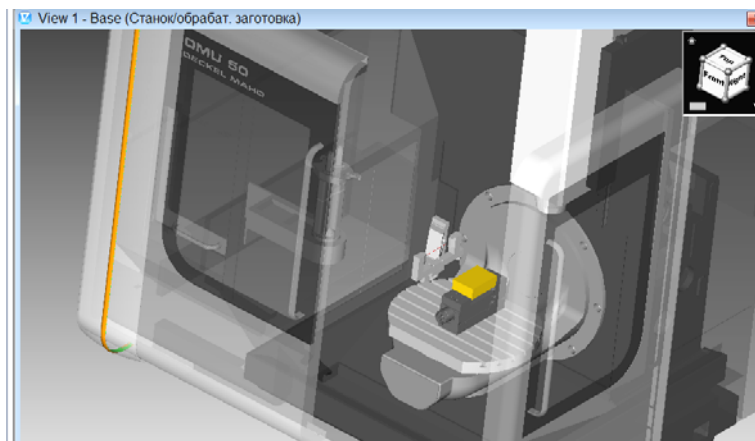


Рис. 1. Установка заготовки с приспособлением

Создается дерево проекта, где задаются нулевые оси станка, система координат детали, далее устанавливается деталь и приспособление, загружается программа с подпрограммами (рис. 2).

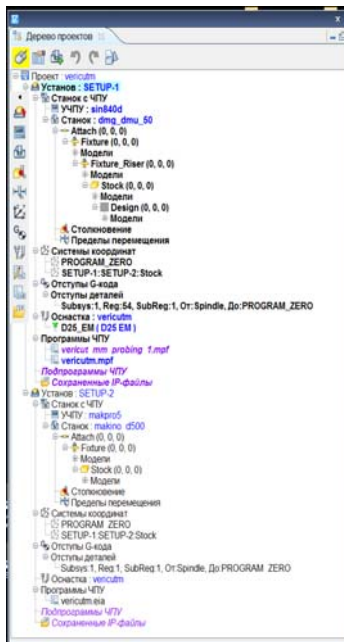


Рис. 2. Дерево проекта

Параметры станка, и положение осей отображается в дереве проекта, программу можно загружать сразу после выхода из постпроцессора. Для поиска и обнаружение ошибок, прежде чем она попадет на станок с ЧПУ, необходимо использовать симуляцию. Можно устанавливать параметры симуляции до первой ошибки в УП или столкновения узлов станка. Если ошибка допущена мы наглядно увидим строку с ошибкой в управляющей программе, как она произошла, а также что послужило причиной для этого.

По окончании процесса симуляции, если ошибок не обнаружено, мы получим готовую 3D-модель детали, у которой можно проконтролировать линейные размеры и сравнить их с чертежом, в случае отклонения размеров произвести корректировку в управляющей программе, после чего симуляцию повторить заново.

Среда VERICUT позволяет подготовить управляющую программу без задействования ЧПУ станка, особенно это необходимо для специфики корпусных деталей РКТ, так как обработка занимает несколько дней, и обнаружить ошибку необходимо заранее. Развитие технологий проверки управляющей программы должно стремиться к безаварийной работе оборудования и получение готовых деталей без дефектов.

© Цугленок М. Н., 2019

УДК 621.7

## СОФТ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ СТАНКОВ ЧПУ

М. Н. Цугленок, А. С. Герман

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: sotjro@mail.ru

*Рассмотрена возможность предварительной проверки управляющей программы станков с числовым программным управлением для обработки корпусных деталей РКТ.*

*Ключевые слова: управляющая программа, станок с числовым программным управлением*

## SOFTWARE FOR CHECKING THE GOVERNING PROGRAM FOR CNC MACHINES

M. N. Tsuglenok, A. S. German

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: sotjro@mail.ru

*The possibility of preliminary verification of the control program of numerically controlled machines for processing hull parts of the RCT is considered.*

*Keywords: control program, numerically controlled machine.*

В изделиях ракетно-космической техники широко применяются вафельные оболочки разной геометрической формы – цилиндрические, конические сферические и др. Которые являются основными несущими конструкциями РКТ. По существующей технологии выполнение вафельного фона производится методом фрезерования на специальном технологическом оборудовании – фрезерных станках с системой слежения за остаточной толщиной полотна.

Фрезерная обработка таких деталей занимает большой объем времени порядка 60–120 нормо-часов, большой расход материала и режущего инструмента (рис. 1).

Колоссальное количество размеров и их точность обеспечиваются управляющей программой (УП) и станком с ЧПУ, что делает необходимым проведение предварительной проверки, как непосредственно самого станка, так и управляющей программы.

Проверка УП реализуется двумя способами:

– запуск станка на холостом ходу и визуальный контроль следа. Проверяется правильность хода траектории и столкновение узлов станка с деталью. Недостатком является большой объем времени для проверки и загрузка станка;

– проверка в среде VERICAD, исследование УП и моделирование оборудования и его кинематики, глубины съема материала. Данный метод позволяет проверить УП без использования станка с ЧПУ (подходит не для всех станков, участвующих в обработке ВФ).

Новое разработанное приложение для проверки позволяет проверить управляющие программы всех станков, участвующих в изготовлении вафельного

фона. Приложение работает в системе Visual Basic Applications, что позволяет интегрировать её во многие CAD-системы (рис. 2).

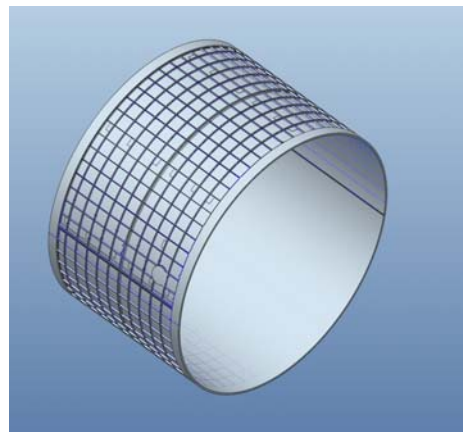


Рис. 1. Модель детали

Прорисовка траекторий представляет собой линии и контуры ячеек, проецируемых в CAD-систему, данные поступают в формате G-code. Образованные перемещения, преобразуются в контуры, геометрические объекты, которые можно использовать для контроля зарезов и задвоенных мест программы. На полученной развёртке можно проставить необходимые размеры для контроля рёбер, платиков, сложных геометрических элементов вафельного фона. Фактически создается подобие чертежа для наглядного контроля и сверки с конструкторским чертежом.

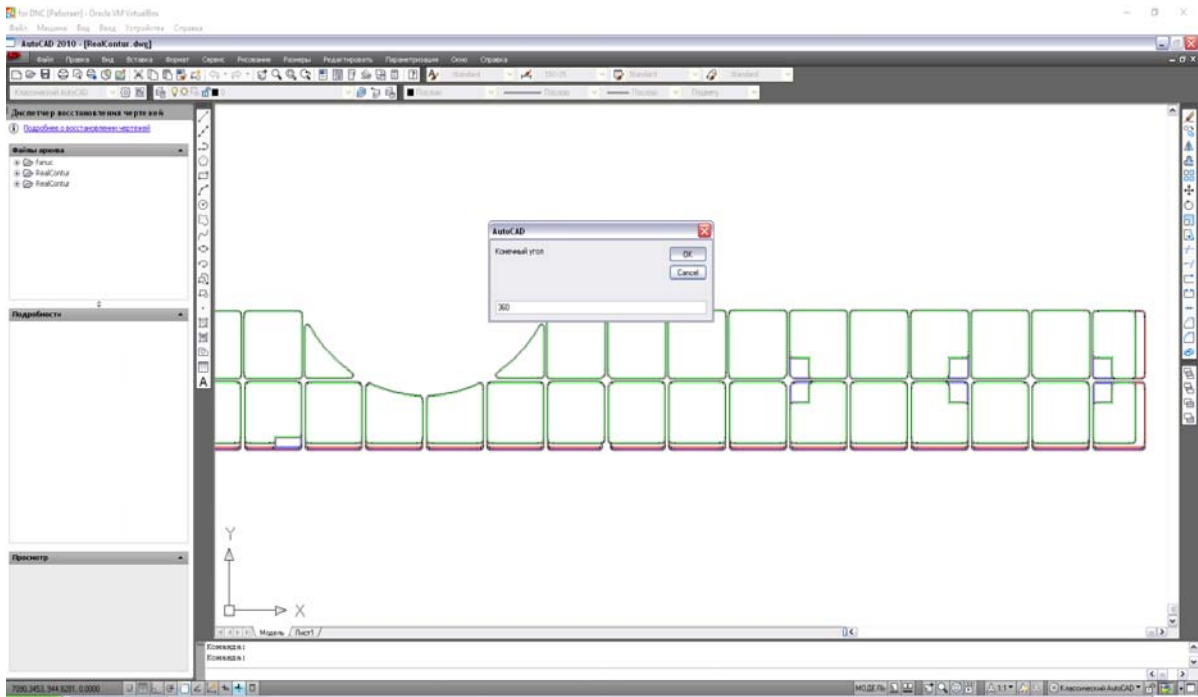


Рис. 2. Пример прорисовки УП на базе AutoCAD

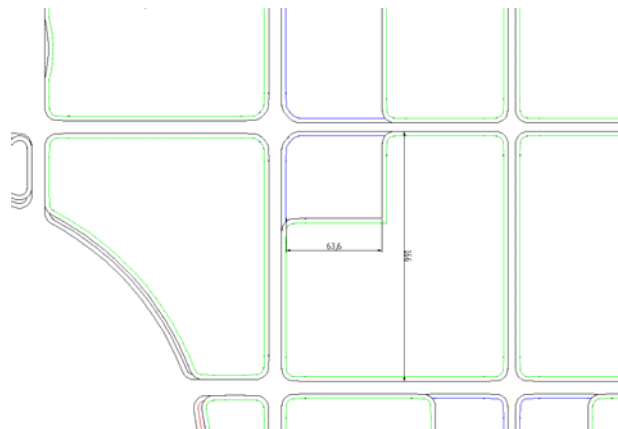


Рис. 3. Простановка размеров контроля УП

Появляется возможность предотвратить врезания и разрезы на деталях ещё на этапе разработки управляющей программы (рис. 3).

Детали вафельного фона является самыми объёмными по объёму обработки и количеству исполнительных размеров. Актуальным направлением технологического развития перед машиностроительными

предприятиями является сокращение брака и огромного количества машинного времени и дорогостоящего материала, совершенствуя методы контроля, используя разного типа проверки УП.

© Цугленок М. Н., Герман А. С., 2019

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ГАЗОСТАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА

Т. А. Шевченко

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: tanja-taja2@mail.ru

*Высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО) – эффективный способ устранения дефектов в литых деталях, предназначенных для работы в условиях высокой напряженности. Повышение плотности литого материала в результате ВГО способствует увеличению не только механических, но и целого ряда специальных свойств.*

*Ключевые слова: ВГО, литые детали.*

## HIGH-TEMPERATURE GAS-STATIC TREATMENT OF PARTS OF TURBOPUMP ASSEMBLY

T. A. Shevchenko

JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: tanja-taja2@mail.ru

*High-temperature gas-static treatment – effective way to eliminate defects in cast parts designed to work in conditions of high tension. The increase in density of cast material as a result of HGT contributes to an increase in mechanical properties.*

*Keywords: VGO, cast part.*

Детали турбонасосных агрегатов, такие как корпуса, центробежные колёса и турбины, изготавливаемые методом литья по выплавляемым моделям из сплавов ВНЛ-1, ВНЛ-6 и ВНЛ-14, подвержены возникновению большого количества дефектов литых поверхностей, таких как рыхлоты, поры, окисные плёны. Подобные дефекты могут оказывать негативное влияние и создавать напряжённость в местах дефектов, что сказывается на работоспособности деталей и их надёжности.

Высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО) – эффективный способ устранения усадочных пор в отливках. Устранение внутренней пористости в отливках приводит к получению металлографически выявляемой бездефектной структуры, а так же существенному повышению механических свойств металла. Суть метода заключается в том, что происходит всестороннее обжатие детали газовой средой, в которой рабочим телом является газ аргон, нагретый до 1280 °С под давлением 200 МПа в течение 15 минут [1]. Необходимо создать на поверхности отливки минимальное давление водорода, кислорода и азота, чтобы ускорить выведение газов из раковин отливки. Этого можно достичь путем создания высокого вакуума или применением высокочистого аргона или гелия. Оба процесса равноценны по созданию малого парциального давления водорода и кислорода над поверхностью отливки и ускорения зарастания раковин в отливке [3].

Повышение плотности литого материала в результате ВГО способствует увеличению не только механических, но и целого ряда специальных свойств: свариваемости, термоусталости, обрабатываемости резанием, вакуумной плотности, равномерности химической обработки [2]. При затвердевании расплавленного металла пузырьки выделившегося газа иногда не успевают удалиться в расплав и захватываются затвердевшим металлом, образуя раковины, заполненные газом. При больших скоростях кристаллизации пустоты, как правило, сферические, а при медленных они имеют вытянутую форму вдоль направления кристаллизации [3]. ВГО выполняют до термообработки обработки и до окончательной механической обработки деталей.

На практике, введение ВГО значительно улучшает качество деталей, полученных методом литья по выплавляемым моделям, благодаря статистике мы можем наблюдать положительную динамику в части уменьшения на 80–90 % такого дефекта, как рыхлота, что значительно улучшает механические и прочностные характеристики деталей ТНА.

### Библиографические ссылки

1. Повышение механических и эксплуатационных свойств литых заготовок / В. И. Якимов, А. И. Евстигнеев, Е. В. Захарова [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1580774&selid=26105029> (дата обращения 10.08.2019).



2. Косинов А. К., Оборин Л. А. Совершенствование технологии производства литых заготовок турбо-насосного агрегата [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22603102> (дата обращения 10.08.2019).

3. Резяпов В. Ш., Жуковский В. Б., Кляцкин А. С. Направленная кристаллизация расплава и последующая высокотемпературная газостатическая обработка как инструмент уменьшения литейных дефектов [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plakirovannye-obsypki-v-litie-po-vyplavlyаемым-modelyam> (дата обращения 10.08.2019).

4. Технология металлов / В. В. Архипов, М. А. Касенков, М. Н. Ларин. М., 1959. 767 с.

#### References

1. Povyshenie mekhanicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv litykh zagotovok / V. I. Yakimov, A. I. Evstigneev, E. V. Zakharova [Electronic resource]. URL:

<https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1580774&selid=26105029> (access: 10.08.2019).

2. Kosinov A. K., Oborin L. A. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva litykh zagotovok turbonasosnogo agregata [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22603102> (access: 10.08.2019).

3. Rezyapov V. Sh., Zhukovskiy V. B., Klyatskin A. S. Napravlenная kristallizatsiya raspлаva i posleduyushchaya vysokotemperaturnaya gazostaticheskaya obrabotka kak instrument umen'sheniya liteynykh defektov [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plakirovannye-obsypki-v-litie-po-vyplavlyаемым-modelyam> (access: 10.08.2019).

4. Tekhnologiya metallov / V. V. Arkhipov, M. A. Kasenkov, M. N. Larin. Moscow, 1959. 767 p.

© Шевченко Т. А., 2019

## РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ ХИМИЧЕСКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

И. Я. Шестаков, А. В. Хилюк, Н. Г. Слепнева, Л. А. Бабкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: h-anna7@bk.ru

*Непрерывное расширение области применения алюминия как конструкционного материала и его высокая химическая активность в ряде агрессивных сред послужили причиной использования технологических процессов химического фрезерования.*

*Химическое фрезерование алюминия и его сплавов – это вид обработки, заключающийся в вытравливании металла. Химическое фрезерование применяется, когда механическая обработка металла крайне трудоемка и экономически невыгодна. Однако в процессе травления алюминия образуется шлам, который необходимо нейтрализовать.*

*Ключевые слова: алюминий, алюминиевые сплавы, химическое фрезерование, сесквикарбонат натрия.*

## X-RAY PHASE ANALYSIS OF SOLID WASTE OF CHEMICAL MILLING OF PARTS OF AIRCRAFT FROM ALUMINUM ALLOYS

I. Y. Shestakov, A. V. Khilyuk, N. G. Slepneva, L. A. Babkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: h-anna7@bk.ru

*The continuous expansion of the field of application of aluminum as a structural material and its high chemical activity in a number of aggressive environments caused the use of chemical milling processes. Chemical milling of aluminum and its alloys is a type of processing consisting in etching of metal. Chemical milling is used when metal machining is extremely time-consuming and economically unprofitable. However, in the process of etching aluminum sludge is formed, which must be neutralized.*

*Keywords: aluminum, aluminum alloys, chemical milling, sodium sesquicarbonate.*

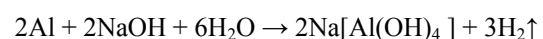
В авиации, ракетостроении, общем машиностроении, строительстве и высокотехнологических отраслях промышленности широко применяются алюминий и его сплавы, обладающие необходимыми требованиями по прочности, коррозионной стойкости и плотности. Для их обработки используются гальванические технологии (такие как обезжиривание, травление, анодирование, химическое фрезерование), которые являются наиболее эффективными и экономичными, а нередко и единственно возможными способами изготовления деталей и заготовок.

Химическое фрезерование используется для получения необходимой конфигурации, криволинейности поверхности, рельефных изображений, т. е. удаление с незащищенной поверхности слоя металла, глубина которого может быть предварительно задана. Равномерность химического фрезерования зависит от чистоты поверхности металла до травления, степени загрязнения продуктами травления, положения деталей в ванне [1].

Алюминий и его сплавы растворяются в водных растворах щелочей и некоторых кислот, например, соляной, фосфорной и др. Щелочные растворы для глубокого травления алюминиевых сплавов имеют

ряд преимуществ перед кислотами. Стоимость щелочных растворов меньше, чем кислот. Оборудование под щелочные растворы может быть изготовлено из простого железа, тогда как для растворов кислот необходимо иметь кислотостойкий материал [2]. При химическом фрезеровании алюминий и его сплавы обрабатывают в растворе едкого натра (100–200 г/л) при температуре 60–80 °С. При действии щелочи на сплав слой оксида растворяется, образуя алюминаты. Алюминий, лишенный защитной пленки, взаимодействует с водой, вытесняя из нее водород. Образующийся гидроксид алюминия реагирует с избытком щелочи. В результате в растворе образуется тетрагидроксоалюминат натрия.

Данные процессы можно записать в виде суммарной реакции [3]:



При химическом фрезеровании из водного раствора едкого натра выпадает осадок – шлам, который концентрируется на дне ванны. По мере накопления осадок загружается в металлические ёмкости и хранится на воздухе при комнатной температуре. Образец осадка для анализа представлял собой слоистые

корочки между которыми находился дисперсный порошок белого цвета.

Проведенный рентгенофазовый анализ (РФА) на рентгеновском дифрактомере ДРОН-3 образца шлама (осадок раствора химического фрезерования алюминиевого сплава АМг6) показал, что основной фазой является сесквикарбонат натрия ( $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2\text{H}_2\text{O}$ ) и в подчиненных количествах присутствуют гиббсит ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и брусит ( $\text{Mg}(\text{OH})_3$ ). Сесквикарбонат натрия (трона) встречается в природе и используется в составах экологически безопасных бесфосфатных моющих средств, в производстве косметических средств, что связано с наличием положительного дерматологического эффекта и дезинфицирующих свойств. Сесквикарбонат натрия применяют для десульфизации кислотных газов промышленных предприятий, обработки промышленных и городских сточных вод, регулирования pH воды плавательных бассейнов [4; 5].

Проблематичность использования природной троны заключается в том, что этот материал очень трудно добывать. Его месторождения находятся только в нескольких местах на планете. Наиболее известные запасы троны находятся в США, Китае, Ближнем Востоке, Кении, Австралии, Ливии, Египте. В нашей стране ее добывают на территории Западной Сибири.

Одним из возможных путей утилизации осадка, образующегося в результате химического фрезерования алюминия, является использование сесквикарбоната натрия, после его предварительной очистки от примесей, а также применение гиббсита для получения алюмосиликатов, применяемых в очистке сточных вод.

#### Библиографические ссылки

1. Эйчис А., Темкина Б. Технология поверхностной обработки алюминия и его сплавов. М.: Машгиз, 1963. 490 с.

2. Сателъ Э. Проблемы развития технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1968. 592 с.

3. Хлыстов А. И., Власов А. В., Коннов М. В. Применение высокоглиноземистых шламов в технологических процессах производства обжиговых и безобжиговых огнеупоров // Вестник ОГУ. 2013. № 5. С. 218–221.

4. А. с. № 443840. Способ получения сесквикарбоната натрия / Б. А. Шихов и др. Кл С01D 7/14, // Б.И. 1974-25-09. № 35. 2 с.

5. Неволин Ф. В. Химия и технология синтетических моющих средств. М.: Пищевая промышленность, 1971. 224 с.

#### References

1. Eychis A., Temkina B. *Tekhnologiya poverkhnostnoy obrabotki alyuminiya i ego splavov*. [Technology of surface treatment of aluminum and its alloys]. Moscow, MASHGIZ, 1963. 490 p.

2. Satel' E. *Problemy razvitiya tekhnologii mashinostroeniya*. [The use of high-alumina sludge in the technological processes of production kiln and non-fired refractories]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 592 p.

3. Khlystov A. I., Vlasov A. V., Konnov M. V. *Primenenie vysokoglinozemistykh shlamov v tekhnologicheskikh protsessakh proizvodstva obzhigovykh i bezobzhigovykh ogneuporov*. [Technology of surface treatment of aluminum and its alloys]. Moscow, Vestnik OGU. 2013. № 5. P. 218–221.

4. Shikhov B. A. *Sposob polucheniya seskvikarbonata natriya*. [Method for producing sodium sesquicarbonate]. Patent USSR, № 443840. 1974.

5. Nevolin F. V. *Khimiya i tekhnologiya sinteticheskikh moyushchikh sredstv*. [Chemistry and technology of synthetic detergents]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1971. 224 p.

© Шестаков И. Я., Хилюк А. В., Слепнева Н. Г., Бабкина Л. А., 2019

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ОБЪЕМОВ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Е. О. Ширшов<sup>1,2\*</sup>, Е. В. Сугак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: shirschovjena@hotmail.com

*Данная проблема связана с основными требованиями к помещениям, в которых проходят измерения объемов баков. Решение данной проблемы снижает общую погрешность измерений установок.*

*Ключевые слова: вентиляция, техническое помещение, температура, РКТ, влажность.*

## SOLUTION OF PROBLEMS OF THE WORK AREA WHEN MEASURING VOLUMES IN MISSILE BUILDING

Е. О. Shirshov<sup>1,2\*</sup>, Е. V. Sugak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

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

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: shirschovjena@hotmail.com

*This problem is associated with the basic requirements for the premises in which the measurement of tank volumes. The solution to this problem reduces the overall measurement error of the installations.*

*Keywords: ventilation, technical room, temperature, RKT, humidity.*

Современные методы измерения объемов баков в ракетно-космической технике (РКТ) несут за собой ряд требований, к которым относится постоянство температуры, влажности и скорости потока воздуха [1]. В связи с этим были проанализированы способы соблюдения данных требований в рабочих помещениях [2].

Постоянство температур на узловых точках измерительного оборудования необходимо поддерживать постоянным притоком воздуха с неизменной температурой и влажностью. Также вход в помещение должен осуществляться только через специальные помещения, в которых предварительно будет проходить уравнивание температурных характеристик помещения.

Для подачи воздуха с постоянной температурой и влажностью необходимо создать отдельное техническое помещение, в которое будет осуществляться подача воздуха с улицы с одновременной его очисткой с помощью фильтров и специального оборудования. Трубы, по которым воздух с улицы попадает в первое помещение, должны быть изолированы от прямого контакта с воздухом в помещении для исключения образования конденсата [3].

Приток воздуха необходимо осуществлять через специальные переходники, оборудованные системой фильтрации воздуха от крупных, средних и мелких частиц пыли и грязи. Переходники должны быть дос-

тупны для проведения ремонта и технического обслуживания фильтров [4].

В помещении для предварительной подготовки воздуха воздух нагревается или охлаждается, после чего увлажняется или осушается в зависимости от текущих параметров в рабочей зоне установки. Так как изменение температуры в рабочем помещении не допускается, то поддержание температуры путём размещения нагревательных приборов и путем нагнетания воздуха с более высокой или низкой температурой не допускается. Следовательно, воздух в техническом помещении должен полностью соответствовать характеристикам рабочей среды.

После уравнивания характеристик воздуха в обоих помещениях, воздух из технического помещения должен нагнетаться в рабочую зону с помощью вентиляторов. Одновременно осуществляется отток воздуха из рабочей зоны с помощью вентиляторов идентичной мощности. Отток воздуха должен находиться непосредственно возле элементов установки, на которых возможно изменение температуры, то есть все части установки, содержащие нагревательные элементы или элементы, которые в процессе работы снижают свою температуру [5].

Так как давление окружающей среды при измерениях установки учитывается, следовательно, скорость подачи воздуха должна соответствовать скорости оттока воздуха.

Подача воздуха должна происходить через специальные сопла горизонтального типа так, чтобы воздух был направлен параллельно стенкам помещения для предотвращения резкого изменения температур окружающей среды и рабочей зоны.

Сотрудники после установки измеряемого объекта и система управления установкой должны находиться в отдельной герметичной зоне, оборудованной собственной отдельной системой вентиляции для предотвращения их влияния на процесс измерения.

В связи с тем, что одним из требований к помещению является отсутствие сквозняков, то скорость воздуха должна быть не более 0,2 м/с [6].

Проанализировав весь процесс измерений и перечень требований было выявлено, что поддержание постоянства микроклимата помещения необходимо обеспечивать с помощью системы вентиляции [7].

#### Библиографические ссылки

1. ОСТ 92-1039–82. Изделия отрасли. Типовые технологические процессы измерения объемов емкостей газами. М. : Изд-во стандартов, 1982.
2. Ширшов Е. О., Сугак Е. В. Современные методы измерения объемов в ракетостроении // Решетневские чтения : материалы XXII Межд. научно-практ. конференции. В 2 ч. Ч. 1 / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 352–353.
3. СНИП 3.05.01–85. Внутренние санитарно-технические системы М. : Изд-во стандартов 1985.
4. ГОСТ Р 51251–99. Фильтры очистки воздуха. Классификация. Маркировка. М. : Изд-во стандартов, 1999.
5. ГОСТ Р 56638–2015. Чистые помещения. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 2015.
6. ANSI/ASHRAE STANDARD 55–2004. Thermal environmental conditions for human occupancy, copyright Ashrae, 2004.
7. Ширшов Е. О., Козлов С. В., Сугак Е. В. Современный подход к решению проблем измерения объемов в ракетостроении // Инновации в науке. 2019. № 5(93). С. 42–44.

#### References

1. OST 92-1039–82. Izdeliya otrasli. Tipovye tekhnologicheskie protsessy izmereniya ob'emov emkostey gazami. Moscow, Publishing House of Standards, 1982.
2. Shirshov E. O., Sugak E. V. Sovremennye metody izmereniya ob'emov v raketostroenii // Reshetnevskie chteniya : Mat. XXII Mezhd. nauchno-prakt. konferentsii. V 2 ch. Ch. 1 / SibGU im. M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2018. P. 352–353.
3. SNiP 3.05.01–85. Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie sistemy. Moscow, Publishing House of Standards, 1985.
4. GOST R 51251–99. Fil'try ochistki vozdukha. Klassifikatsiya. Markirovka. Moscow, Publishing House of Standards, 1999.
5. GOST R 56638–2015. Chistye pomeshcheniya. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. Obshchie trebovaniya. Moscow, Publishing House of Standards, 2015.
6. ANSI/ASHRAE STANDARD 55–2004. Thermal environmental conditions for human occupancy, copyright Ashrae, 2004.
7. Shirshov E. O., Kozlov S. V., Sugak E. V. Sovremennyy podkhod k resheniyu problem izmereniya ob'emov v raketostroenii // Innovatsii v nauke. 2019. № 5(93). P. 42–44.

© Ширшов Е. О., Сугак Е. В., 2019



**Секция**

**«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»**

## СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ФИЛЬТР НА МИКРОПОЛОСКОВОМ МНОГОМОДОВОМ РЕЗОНАТОРЕ

Б. А. Беляев, С. А. Ходенков\*, Т. И. Чурикова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: hsa-sibsau@mail.ru

*Представлена конструкция полосно-пропускающего СВЧ фильтра. Использование нового многомодового резонатора позволяет реализовать сверхширокополосный фильтр, способствующий расширению каналов передачи информации в космической связи.*

*Ключевые слова: многомодовый резонатор, сверхширокополосный фильтр, амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания, диэлектрическая подложка.*

## THE WIDEBAND FILTER BASED ON MICROSTRIP MULTIMODE RESONATOR

B. A. Belyaev, S. A. Khodenkov\*, T. I. Chyurikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: hsa-sibsau@mail.ru

*The construction of the band-pass microwave filter is presented. The use of a new multimode resonator makes it possible to implement a wideband filter, which contributes to the expansion of information transmission channels in space communications.*

*Keywords: multimode resonator, wideband filter, amplitude-frequency characteristics, passband, dielectric substrate.*

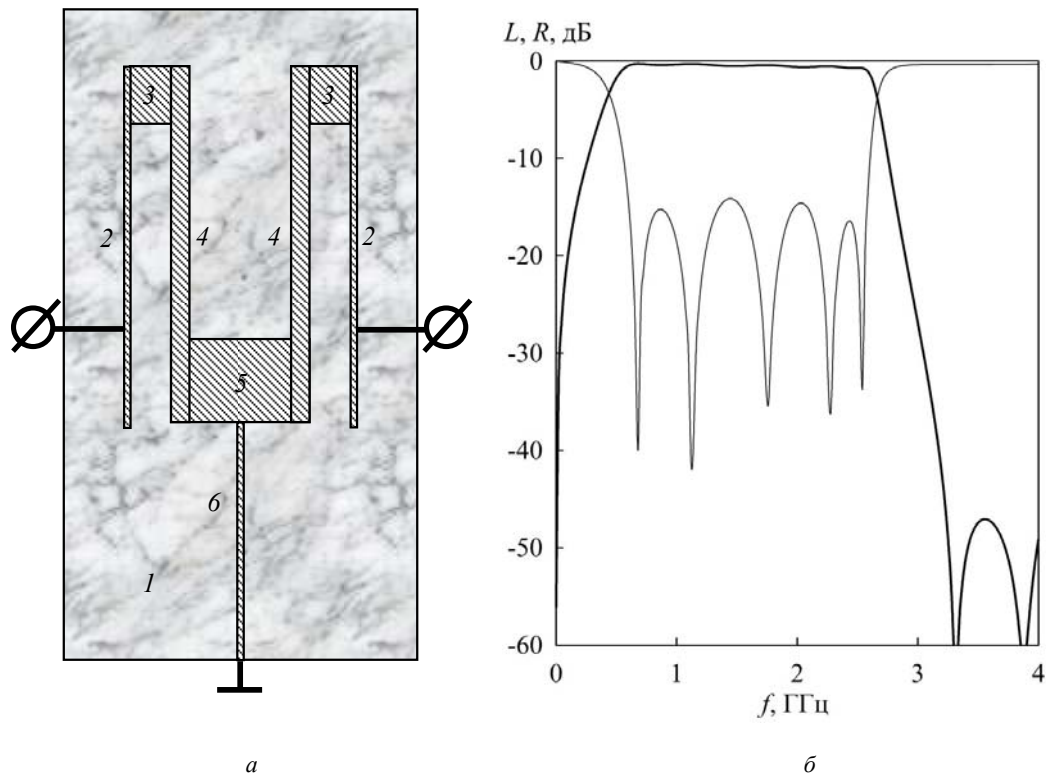
**Введение.** Освоение и использование космического пространства невозможно без постоянного совершенствования космической техники, в том числе и совершенствования устройств передачи и приема информации. Фильтры СВЧ диапазона [1–3] традиционно используются в узлах радиоаппаратуры, в том числе применяемой при осуществлении космической и тропосферной связи. На сегодняшний день перед разработчиками полосно-пропускающих СВЧ фильтров стоят задачи не только постоянного улучшения их электрических характеристик, а также уменьшения их размеров, но и увеличения рабочей ширины полосы пропускания, что способствует расширению каналов передачи информации. По совокупности таких параметров как миниатюрность, технологичность и дешевизна при массовом производстве, хорошо зарекомендовали себя фильтры на основе микрополосковых резонаторов [4; 5], в том числе и многомодовых [6; 7].

**Микрополосковый сверхширокополосный фильтр.** В настоящей работе представлена новая конструкция сверхширокополосного микрополоскового фильтра (см. рисунок), реализованного с использованием только одного многомодового резонатора. Электрические характеристики разработанной 3D-модели фильтра были исследованы при помощи электродинамического численного анализа. В расчетах использовались параметры достаточно распространенного СВЧ материала – керамика ТБНС (см. рисунок, позиция (1)). В данном случае его диэлектрическая

проницаемость и толщина были следующие:  $\epsilon = 80$ ,  $h = 1$  мм, соответственно. Также при синтезе фильтра была зафиксирована его центральная частота полосы пропускания –  $f_0 = 1,55$  ГГц. Настройка такого частотно-селективного устройства осуществлялась «ручным» параметрическим синтезом, при котором подбирались длина и ширина прямоугольных отрезков (2)–(6) полоскового проводника (ПП).

Расположенный на верхней стороне диэлектрической подложки полосковый проводник с отрезками (2)–(6), по сути, является многомодовым микрополосковым резонатором. При этом чередующиеся узкие (2), (4) и широкие (3), (5) отрезки ПП состыкованы друг с другом в форме «нерегулярного» меандра. Отрезок (5) соединен с ортогонально расположенным протяженным отрезком (6), который свободным концом заземлен на основание.

Разберем принцип действия микрополоскового многомодового резонатора. Расположенные на подложке отрезки (4)–(6) ПП представляют собой трехмодовый резонатор, три нижайшие моды колебаний которого формируют полосу пропускания микрополоскового фильтра. Дальнейшее наращивание отрезков (2), (3) с обеих сторон проводника, т.е. увеличение числа «периодов» меандра, позволяет «добавить» в полосу пропускания фильтра еще два резонанса. Таким образом, представленный фильтр имеет пятый порядок и относительную ширину полосы пропускания  $\Delta f/f_0 \sim 144\%$ .



Топология полоскового проводника сверхширокополосного микрополоскового фильтра (а) и его амплитудно-частотная характеристика (б)

Стоит указать, что увеличение длины отрезка (б) сопровождается расширением полосы пропускания фильтра.

Важно отметить, что такой многомодовый резонатор можно модернизировать, усложняя рисунок полоскового проводника сверхширокополосного фильтра, что сопровождается существенным улучшением его частотно-селективных свойств. При этом у заявленного фильтра подавление мощности в высокочастотной полосе заграждения превышает 45 дБ.

Приведем геометрические размеры отрезков полоскового проводника многомодового резонатора: (2) –  $6,1 \times 0,1$  мм, (3) –  $1,0 \times 0,7$  мм, (4) –  $6,0 \times 0,3$  мм, (5) –  $1,7 \times 1,4$  мм, (6) –  $4,0 \times 0,1$  мм.

**Заключение.** Таким образом, показана возможность существенного расширения полосы пропускания микрополоскового фильтра за счет использования в конструкции оригинальной топологии полосковых проводников пятимодового резонатора.

#### References

1. Djaiz A., Denidni A. A new compact microstrip two-layer bandpass filter using aperture-coupled SIR-hairpin resonators with transmission zeros // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2006. Vol. 54, № 5. P. 1929–1936.

2. Min B.-C., Choi Y. H., Kim S. K. B. Oh. Cross-coupled band-pass filter using HTS microstrip resonators // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2001. Vol. 11, № 1. P. 485–488.

3. Uher J., Hofer W. J. R. Tunable microwave and millimeter-wave bandpass filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1991. Vol. 39, № 4, P. 643–653.

4. Gan H., Lou D., Yang D. Compact microstrip bandpass filter with sharp transition bands // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2006. Vol. 16, № 3. P. 107–109.

5. B. A. Belyaev, A. M. Serzhantov, A. A. Leksikov, Ya F. Bal'va, An A. Leksikov. Novel High-Quality Compact Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2015. Vol. 25, № 9. P. 579–581.

6. Athukorala L., Budimir D. Compact Dual-Mode Open Loop Microstrip Resonators and Filters // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2009. Vol. 19, № 11. P. 11698–700.

7. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Galeev R. G., Shabanov V. F. Investigation of Microstrip Structures of Wideband Bandpass Filters // *Doklady Physics*. 2015. Vol. 60, № 3. P. 95–101.

© Беляев Б. А., Ходенков С. А., Чурикова Т. И., 2019



## ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ СПУТНИКА

Н. Е. Вдовин\*, Е. П. Олейников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: vdovin\_ne@mail.ru

*Представлены пассивные системы управления ориентацией спутника, их достоинства и недостатки.*

*Ключевые слова: пассивная система, ориентация спутника, гравитационные системы, магнитные системы.*

## PASSIVE SATELLITE CONTROL SYSTEMS

N. E. Vdovin\*, E. P. Oleynikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: vdovin\_ne@mail.ru

*Passive satellite orientation control systems, their advantages and disadvantages are presented.*

*Keywords: passive system, satellite orientation, gravitational systems, magnetic systems.*

**Введение.** Одной из самых важных проблем, которую необходимо решать почти в течение всего полета практически всех искусственных спутников, является реализация их назначенного углового движения. Спутнику устанавливается нужное угловое положение относительно определенных ориентиров поворотом вокруг центра масс. Роль этих ориентиров играют видимые небесные и наземные объекты (горизонт, Солнце, Луна) или же направления в пространстве (местная вертикаль, вектор напряженности геомагнитного поля, вектор скорости набегающего потока воздуха), которые допустимо определить при помощи измерительных приборов. В то же время спутник, например, нижним днищем, с укрепленной антенной направленного действия и объективом видеокамеры, должен быть непрерывно наведен на центр Земной поверхности.

Пассивные системы ориентации, применяющие содействие с внешними полями натурального происхождения, не расходуют рабочее тело и энергию, изготовленные внутри спутника. Возможно, только в начальный период времени будет необходима их кратковременная трата для приведения системы ориентации в надлежащее положение, к примеру, выдвинуть штанги, завернуть часть спутника, разарретировать магниты [1].

Можно выделить два типа пассивных систем ориентации спутников: гравитационные и магнитные.

**Гравитационные системы.** Принцип получения восстанавливающего момента в гравитационной системе ориентации реализуется следующим образом. Гравитационное поле Земли в первом приближении можно аппроксимировать центральным ньютоновым полем, когда сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния до центра планеты. Если представить себе спутник в виде гантели – двух гру-

зов, закрепленных на разных концах жесткого невесомого стержня, центр масс которой движется по орбите вокруг Земли, то сила притяжения грузов будет различной – более сильное притяжение будет у того груза, который находится ближе к центру Земли. Возникает момент сил, пытающийся зафиксировать гантель параллельно местной вертикали. Помимо гравитационного момента гантель находится под действием момента сил инерции в неинерциальной орбитальной системе координат. В совокупности эти два момента обеспечивают стабильность положений равновесия, когда ось гантели соответствует местной вертикали. У гантели существуют два устойчивых расположения равновесия – головой вверх и головой вниз параллельно местной вертикали, и, кроме того, два неустойчивых положения равновесия – на левом боку и на правом боку по длине касательной к орбите [1–3].

**Магнитные системы.** Для получения управляющих моментов в магнитных системах используются специальные магнитные исполнительные органы, взаимодействующие с внешним магнитным полем окружающего космического аппарата космического пространства.

Объясняется это прежде всего тем, что с их помощью сравнительно легко выполняются все функции управления, как и в газореактивных системах: предварительное успокоение космического аппарата или, другими словами, гашение начальных угловых скоростей объекта; разгрузка маховичных систем ориентации и регулирование их кинетического момента; пространственные развороты; стабилизация и т. д.

В магнитных системах управления в отличие от всех других систем легко изменять управляющие моменты и, следовательно, реализовывать самые разно-

образные законы управления, что позволяет обеспечить точную ориентацию.

**Достоинства пассивных систем:** не тратят энергию источников питания на борту, а используют для формирования управляющих моментов естественные силы, действующие в среде космического пространства; имеют простую конструкцию, высокую долговечность и почти неограниченный срок эксплуатации; ориентируют космическую установку в указанном положении в течение большого промежутка времени, но в связи с тем, что они не рассчитаны на длительное время активного существования, быстроедействие не имеет весомого значения; не засоряют окружающее пространство вокруг космического аппарата отработанными компонентами, которые создают огромные неудобства при функционировании оптических систем ориентации;

**Недостатки пассивных систем:** имеют низкую точность; управляющие моменты малы по величине, поэтому к ним предъявляются требования высокой точности начальной ориентации и малости угловых скоростей [2–5].

#### Библиографические ссылки

1. Овчинников М. Ю. Системы ориентации спутников: от Лагранжа до Королева. Математика [Электронный ресурс]. 1999. URL: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/908.html> (дата обращения: 10.09.2019).
2. Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М. : Машиностроение, 1975. 248 с.

3. Пассивная магнитная система ориентации первого российского наноспутника ТНС-0 / Н. В. Куприянова, М. Ю. Овчинников, В. И. Пеньков, А. С. Селиванова. М., 2005 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep46/prep2005\\_46.html](http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep46/prep2005_46.html) (дата обращения: 10.09.2019).

4. Спутниковая связь и вещание : справочник / под ред. Л. Я. Кантора. М. : Радио и связь, 1997.

5. Невдяев Л. М., Смирнов А. А. Персональная спутниковая связь. М. : Эко-Трендз, 1998.

#### References

1. Ovchinnikov M. Y. Satellite orientation systems: from Lagrange to Korolev. Maths [Electronic resource]. 1999. URL: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/908.html> (access: 10.09.2019).

2. Kovalenko A. P. Magnetic control systems for spacecraft. Moscow, Mechanical Engineering, 1975. 248 p.

3. Passive magnetic orientation system of the first Russian nanosatellite TNS-0 [Electronic resource] / N. V. Kupriyanova, M. Yu. Ovchinnikov, V. I. Penkov, A. S. Selivanova. Moscow, 2005. URL: [http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep46/prep2005\\_46.html](http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep46/prep2005_46.html) (access: 10.09.2019).

4. Satellite communications and broadcasting. Reference / ed. L. Ya. Cantor. Moscow, Radio and communications, 1997.

5. Nevdyayev L. M., Smirnov A. A. Personal satellite communications. Moscow, Eco-Trends, 1998.

© Вдовин Н. Е., Олейников Е. П., 2019

УДК 004.94

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ДРАЙВЕРА L298N ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ Д82

Г. М. Гринберг<sup>1\*</sup>, П. Г. Егорова<sup>1</sup>, Н. М. Нуруллаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Казахский национальный педагогический университет имени Абая  
Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, просп. Достык, 13

\*E-mail: grinberg\_gm@mail.ru

*Выполнено экспериментальное исследование возможности применения драйвера L298N для управления электродвигателями Д82, устанавливаемыми в поворотный стенд. Для проведения исследования была разработана экспериментальная установка. В результате выполненного исследования было установлено, что драйвер L298N по своим параметрам подходит для управления электродвигателем Д82.*

*Ключевые слова: испытательный стенд, электродвигатель, драйвер.*

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE APPLICABILITY OF THE L298N DRIVER TO CONTROL D82 MOTOR

G. M. Grinberg<sup>1\*</sup>, P. G. Egorova<sup>1</sup>, N. M. Nurullaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Abai Kazakh National Pedagogical University  
13, Dostyk Av., Alma-Ata, 050010, Republic of Kazakhstan

\*E-mail: grinberg\_gm@mail.ru

*An experimental research of the possibility of using the driver L298N for controlling D82 electric motors installed in a rotary stand was carried out. An experimental facility was developed for the research. It was found that the driver L298N in its parameters is suitable for controlling the D82 electric motor.*

*Keywords: test bench, motor, driver.*

На подвижных объектах (например, самолетах, ракетах, космических аппаратах) для определения их углового положения применяются различные бортовые измерительные приборы [1]. На этапах производства и эксплуатации таких приборов проводятся их испытания, составляющие неотъемлемую часть производственного процесса. Для проведения испытаний применяются специальные стенды [2–5].

Для проведения лабораторных работ по исследованию характеристик бортовых измерительных приборов на кафедре систем автоматического управления разрабатывается испытательный стенд. Стенд предназначен для создания внешних угловых воздействий на бортовые измерительные приборы по углам курса, тангажа, крена и представляет собой трехступенное опорно-поворотное устройство (электромеханический привод) с платформой для установки испытуемого прибора. Вращение подвижных частей опорно-поворотного устройства осуществляется при помощи серводвигателей.

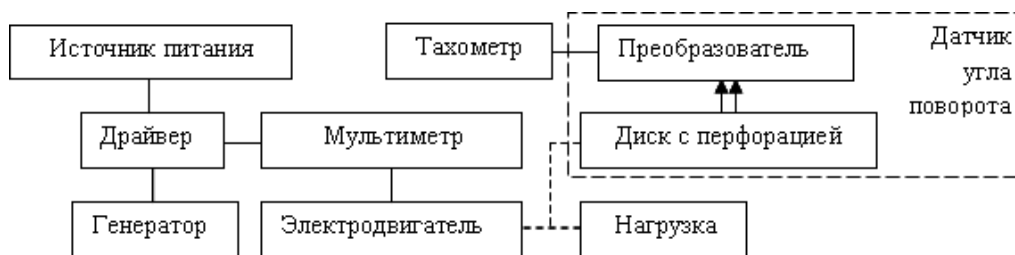
В качестве серводвигателей в установке предполагается использовать электродвигатели постоянного тока типа Д82, которые находят широкое применение в прецизионных электромеханических приводах, требующих плавного регулирования в широком диапазо-

не частоты вращения выходного вала установленных в них электродвигателей.

Для управления электродвигателями предполагается использовать драйвер двигателя L298N [6]. При помощи одной платы L298N можно управлять сразу двумя электродвигателями с напряжением питания от 5 до 35 В. Наибольший рабочий ток, который обеспечивает драйвер, достигает 2 А (при пиковом токе до 3А) на каждый двигатель.

Задачами данного исследования является выяснение возможности использования драйверов L298N для управления работой электродвигателей постоянного тока типа Д82. Для этого была разработана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рисунке.

Электропитание установки осуществлялось от источника питания GPR-77550D с выходным напряжением до 300В и выходной током до 30А. Управляющие импульсы подавались с выхода генератора сигналов специальной формы ГСС-120 с диапазоном частот для основных форм выходного сигнала от 1 мкГц – 5 МГц. Измерение поступающего на электродвигатель напряжения и потребляемого им тока проводилось с помощью многофункционального цифрового вольтметра АВМ-4403.



Структурная схема экспериментальной установки

В качестве нагрузки использовался трехступенчатый редуктор с червячной передачей. Для измерения скорости вращения выходного вала электродвигателя использовался цифровой тахометр ТЦ-3М с диапазоном измерения скорости вращения от 100 до 9999 об/мин.

Датчик угла поворота состоит из диска с перфорацией и преобразователя. Диск выполнен из непрозрачного для инфракрасного излучения материала и закреплен на валу электродвигателя. Перфорация диска выполнена в виде 60 прорезей, равномерно расположенных по окружности диска.

Преобразователь имеет паз, с противоположных сторон которого соосно установлены фотоизлучатель и фотоприемник. Для крепления преобразователя используется кронштейн, ориентирующий преобразователь так, чтобы диск входил в его паз. При вращении диска за счет его перфорации происходит поочередное прохождение светового сигнала от фотоизлучателя к фотоприемнику и его прерывание. При этом на выходе преобразователя формируются импульсы, поступающие на цифровой тахометр.

В ходе выполнения эксперимента изменялись: величина управляющего сигнала и величина нагрузки электродвигателя Д82.

В результате выполненного исследования было установлено, что драйвер L298N по своим техническим параметрам подходит для управления электродвигателями Д82 при их использовании в проектируемом лабораторном стенде по исследованию характеристик бортовых измерительных приборов.

#### Библиографические ссылки

1. Кучерявый А. А. Авионика [Электронный ресурс] : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2016. 452 с. URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/72989/#1> (дата обращения: 13.08.2019).
2. Малогабаритная поворотная установка МПУ-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/78/251/34935.php> (дата обращения: 19.08.2019).
3. Поворотный стенд СИО-1 [Электронный ресурс]. URL: <http://nrmavia.ru/tth/kpa.php#sio> (дата обращения: 19.08.2019).

4. Двухосевые поворотные столы [Электронный ресурс]. URL: <https://sovtest-ate.com/equipment/dvukhosevye-povorotnye-stoly/> (дата обращения: 19.08.2019).

5. Установка УПГ-56 для проверки и испытания гироскопических приборов. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <http://rykovodstvo.ru/instr/39183/index.html> (дата обращения: 19.08.2019).

6. L298N драйвер двигателя 5В [Электронный ресурс]. URL: <https://freedelivery.com.ua/arduino-100/drajvery-dvigatlej-131/l298n-drajver-dvigatelya-5v-mini-modul-arduino-1365.html> (дата обращения: 13.08.2019).

#### References

1. Kucheryavyj A. A. Avionika [Electronic resource] : Uchebnoe posobie. SPb. : Lan', 2016. 452 s. URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/72989/#1> (access: 13.08.2019).
2. Malogabaritnaya poporotaya ustanovka MPU-1. Tekhnicheskoe opisanie i instrukciya po ekspluatácii [Electronic resource]. URL: <https://pandia.ru/text/78/251/34935.php> (access: 19.08.2019).
3. Povortnyj stend SIO-1 [Electronic resource] / URL: <http://nrmavia.ru/tth/kpa.php#sio> (access: 19.08.2019).
4. Dvuhosevye povorotnye stoly [Electronic resource]. URL: <https://sovtest-ate.com/equipment/dvukhosevye-povorotnye-stoly> (access: 19.08.2019).
5. Ustanovka UPG-56 dlya proverki i ispytaniya giroskopicheskikh priborov. Tekhnicheskoe opisanie i instrukciya po ekspluatácii [Electronic resource]. URL: <http://rykovodstvo.ru/instr/39183/index.html> (access: 19.08.2019).
6. L298N drajver dvigatelya 5V [Electronic resource]. URL: <https://freedelivery.com.ua/arduino-100/drajvery-dvigatlej-131/l298n-drajver-dvigatelya-5v-mini-modul-arduino-1365.html> (access: 13.08.2019).

© Гринберг Г. М., Егорова П. Г.,  
Нуруллаев Н. М., 2019

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ\*

А. О. Жуков<sup>1</sup>, И. Н. Карцан<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН

Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Пятницкая, 48

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

\*E-mail: kartsan2003@mail.ru

*Рассматриваются основные показатели качества, такие как точность, надежность, оперативность, экономичность, реализуемость, автономность, универсальность, степень загрузки измерительных средств, загрузка персонала и др. для контроля параметров орбиты космических аппаратов, влияющие на повышение измерительной информации для определения орбиты.*

*Ключевые слова: космический аппарат, параметры орбиты, навигационный сигнал, межспутниковая связь.*

## PROSPECTS FOR INCREASING THE MEASUREMENT INFORMATION TO DETERMINE THE PARAMETERS OF THE SPACECRAFT' ORBIT

A. O. Zhukov<sup>1</sup>, I. N. Kartsan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences  
48, Pyatnitskaya Str., Moscow, 119017, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: kartsan2003@mail.ru

*Basic quality indicators such as accuracy, reliability, efficiency, economy, realizability, autonomy, universality, degree of loading of measuring instruments, personnel load, etc. for control of spacecraft orbit parameters influencing the increase of measuring information for determining the orbit are considered.*

*Keywords: spacecraft, orbital parameters, navigation signal, inter-satellite communication.*

Основными показателями качества контроля параметров орбиты космических аппаратов (КА) являются точность, надежность, оперативность. Могут применяться и некоторые дополнительные показатели, например, экономичность, реализуемость, автономность, универсальность, степень загрузки измерительных средств, загрузка персонала и др. [1–3].

Под точностью контроля параметров орбиты КА понимается степень отличия рассчитанных в результате решения навигационной задачи его орбитальных параметров на каком-то интервале от их истинных значений. Обычно требования к точности являются определяющими и зависят от целевого назначения КА.

Источником информации о реальном движении КА являются результаты измерения текущих навигационных параметров (ИТНП). Процесс определения параметров орбиты КА в общем случае состоит из следующих этапов:

– интегрирование системы на времена проведения ИТНП и нахождение их модельных (расчетных) значений;

– определение отклонений реальных результатов ИТНП от соответствующих расчетных значений (невязок измерений);

– отбраковка аномальных результатов ИТНП;

– формирование системы уравнений, устанавливающих связи между отклонениями измерений и параметрами, определяющими отличие реального и моделируемого движения;

– нахождение оценок этих параметров решением системы уравнений;

– расчет параметров орбиты на заданный момент времени.

Известные физические принципы получения основных видов измеряемых параметров для определения параметров орбиты КА (дальности, углов, радиальных скоростей) реализуются в многочисленных и разнообразных типах измерительных средств.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-00-01125 КОМФИ «Методология оценки и прогнозирования эффективности производственных и транспортно-логистических цепочек в условиях глобальных трансформаций мировой экономики и межгосударственной конфронтации с использованием невоенных методов силового давления».

Их отличия определяются:

- непосредственным видом выполняемых этим средством измерений (дальномерные, угломерные, совмещенные и пр.);
- способом проведения ИТНП (запросные и беззапросные, фазовые, моноимпульсные и др.);
- диапазоном волн, применяемых для проведения ИТНП (радио, инфракрасные и ультрафиолетовые волны, видимый свет);
- местом размещения измерительного средства (на наземном пункте, удаленной станции, на борту КА-измерителя либо непосредственно на самом КА и пр.).

Лазерные спутниковые дальномеры (ЛСД) являются супервысокоточными запросными измерительными системами, которые в настоящее время находят широкое применение в геодезии и геофизике для определения параметров вращения Земли, движения полюсов, материков, движения Луны, проверки положений Общей теории относительности и пр. Первый ЛСД для проведения ИТНП по спутникам Земли был разработан в США в 1961/1962 гг. С тех пор точность измерения дальности с помощью ЛСД возросла на 3 порядка – с нескольких метров до нескольких миллиметров. В настоящее время создана всемирная лазерная сеть ILRS (International Laser Ranging Service).

Возможность получения высокой точности измерения дальности с помощью ЛСД основывается на способности генерации квантовым генератором (лазером) очень короткого, но мощного импульса в сторону спутника (длительностью импульса составляет нано и даже пикосекунды, мощность – сотни мегаватт). Могут использоваться как наземные ЛСД, так и устанавливаемые на борту спутника (наиболее часто – в качестве лазерных высотомеров). Но применение последних для навигации КА вследствие их значительной удаленности от земной поверхности представляется в настоящее время малоэффективным.

Наиболее перспективных применений либо совершенствования применений корреляционно-фазовых пеленгаторов (КФП) для мониторинга КА позволяет выделить следующие направления:

- оперативное определение с помощью измерений КФП параметров гео-, геопереходных и высокоэллиптических орбит КА;
- совершенствование способов определения параметров орбит КА совместной обработкой сеансов ИТНП от нескольких КФП либо от КФП и дальномерно-скоростных измерительных средств;
- использование КФП для обеспечения коллокации геостационарных спутников;
- мониторинг частотных характеристик сигнала от КА.

Наличие определенных проблем затрудняет непосредственное применение измерений от КФП в указанных перспективных направлениях.

Проведенный анализ общей схемы мониторинга КА при использовании различных видов ИТНП, требований к показателям качества такого контроля, характеристик технических средств наземного комплекса управления полетом КА для реализации проведения ИТНП, определения частотных характеристик

излучаемого с КА сигнала, особенностей эксплуатации, применения различных измерительных средств, позволил определить возможности и перспективы повышения эффективности мониторинга КА при использовании КФП: раскрытие неоднозначности угловых измерений, совместная обработка измерений от нескольких КФП при возможном дополнительном привлечении ИТНП от других средств, решение задачи обеспечения безопасного функционирования нескольких геостационарных спутников в районе общей точки стояния, улучшение определения частотных характеристик излучаемого КА сигнала.

На основании оценки состояния исследований по указанным проблемам может быть сделан вывод о необходимости разработки модифицированных процедур, позволяющих выполнять эффективное раскрытие неоднозначности измерений КФП, совместное использование измерений от нескольких пеленгаторов для возможности замены дальномерных средств, применение КФП для решения задачи коллокации геостационарных спутников, определения характеристик излучаемого КА сигнала [4; 5].

Основные подходы к решению поставленных задач заключаются в разработке перечисленных модифицированных процедур и проведению исследований по оценке эффективности их применения с помощью, как модельных примеров, так и реальной измерительной информации. Применение модельных оценок позволяет выполнить имитацию практически любого из исследуемых вариантов использования КФП в рассматриваемой ситуации и получить наиболее объективный результат такого оценивания, поскольку эталонные значения требуемых параметров являются точно известными. Применение реальных результатов ИТНП позволяет установить возможность и эффективность использования исследуемых процедур в условиях различных практических ситуаций.

#### Библиографические ссылки

1. Карцан И. Н. Оценка ресурсного потенциала космических систем // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. участников ежегодной Всерос. научно-технич. конф. молодых ученых и студентов, посвященной 122-й годовщине Дня радио / Сиб. федер. ун-т, Ин-т инженерной физики и радиоэлектроники. Красноярск, 2017. С. 226–228.
2. Карцан И. Н., Самойлов Н. Е., Карелина А. А. Автоматизированная система дистанционного управления спутниковой системой связи // Грани науки 2018 : сб. тр. Междунар. научно-практич. конф. (30 сентября 2018, г. Ростов н/Д). Ростов н/Д., 2018. С. 51–56.
3. Ртищева Н. Г., Скопинцева Л. М., Карцан И. Н. Принципы построения системы адаптации к помеховой обстановке в узком парциальном одноградусном луче // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2017. С. 501–503.
4. Карцан И. Н., Ковалев И. В., Ефремова С. В. Проблемы анализа и синтеза структур сложных систем сетевого взаимодействия наземных пунктов

управления космическими аппаратами // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. научно-практич. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск). Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 390–391

5. Карцан И. Н. Планирование трудозатрат на разработку надёжных программных систем космических аппаратов // Наука в современном информационном обществе : материалы XI Междунар. научно-практ. конф. 2017. С. 169–171.

### References

1. Kartsan I. N. Estimation of the resource potential of space systems // Modern problems of radioelectronics: collection of scientific papers of the participants of the annual All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students, dedicated to the 122nd anniversary of Radio Day. Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics. Krasnoyarsk, 2017. С. 226–228.

2. Kartsan I. N., Samoilov N. E., Karelina A. A. Automated remote control system of the satellite communication system // GRANI NAUKI 2018:

Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, 2018. С. 51–56.

3. Rtischeva N. G., Skopintseva L. M., Kartsan I. N. Principles of building an adaptation system to interference in a narrow partial single-degree beam // Young scientists in solving actual problems of science: a collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference of students, postgraduates and young scientists. Krasnoyarsk, 2017. С. 501–503.

4. Kartsan I. N., Kovalev I.V., Efremova S. V. Problems of analysis and synthesis of the structures of the complex systems of the network interaction of the ground control points of the spacecraft (in Russian) // Reshetnev readings. 2017. T. 1. С. 390–391.

5. Kartsan I. N. Planning of labor costs for the development of reliable spacecraft software systems // Science in the modern information society: materials of the XI International scientific-practical conference. 2017. С. 169–171.

© Жуков А. О., Карцан И. Н., 2019

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ  
МОДИФИЦИРОВАННЫМ КРИТЕРИЕМ НАЙКВИСТА**

Е. А. Мизрах, С. А. Колохматова\*, Т. С. Соболева

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

*Рассмотрен анализ устойчивости стабилизатора напряжения модифицированным критерием Найквиста.*

*Ключевые слова: стабилизатор напряжения, усилитель-сумматор, коэффициент передачи усилителя-сумматора, критерий Найквиста.*

**ANALYSIS OF THE STABILITY OF A VOLTAGE STABILIZER  
BY A MODIFIED NYQUIST CRITERION**

E. A. Mizrakh, S. A. Kolokhatova\*, T. S. Soboleva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ms.svetylka@mail.ru

*A method for analyzing the stability of a voltage stabilizer using the modified Nyquist criterion is studied.*

*Keywords: voltage stabilizer, amplifier-adder, transfer coefficient of the amplifier-adder, Nyquist criterion.*

В настоящее время в непрерывных стабилизаторах напряжения (НСН) широко применяются операционные усилители (ОУ), выполняющие роль усилителей-сумматоров (УС). Особенность ОУ, охваченного жесткой обратной связью, состоит в том, что при изменении коэффициента усиления, изменяется также инерционность (постоянная времени) ОУ. Изменение этих двух параметров оказывает влияние на точность, устойчивость и качество регулирования выходной величины стабилизатора и, в свою очередь, приводит к усложнению динамических расчетов источника известными методами.

В общем случае передаточная функция (ПФ) УС имеет вид аperiодического звена:

$$W_{yc}(s) = \frac{K_{yc}}{T_{yc}s + 1},$$

где  $K_{yc} = \frac{K_{oy}}{1 + K_{oy} \cdot K_{oc}}$ ;  $T_{yc} = \frac{T_{oy}}{1 + K_{oy} \cdot K_{oc}} \cdot K_{yc}$ ,  $T_{yc}$  – коэффициент и постоянная времени замкнутого УС;  $K_{oy}, T_{oy}$  – коэффициент и постоянная времени разомкнутого усилителя.  $K_{oc}$  – коэффициент обратной связи.

При выполнении условия  $K_{oy} \cdot K_{oc} \gg 1$ , коэффициент передачи УС вычисляется по формуле

$$K_{yc} \approx \frac{1}{K_{oc}}.$$

Для анализа устойчивости НСН рассмотрим функциональную схему НСН (рис. 1), которая содержит передаточную функцию (ПФ) УС  $W_{yc}(s)$  и непрерывного усилителя мощности  $W_{ym}(s)$ .

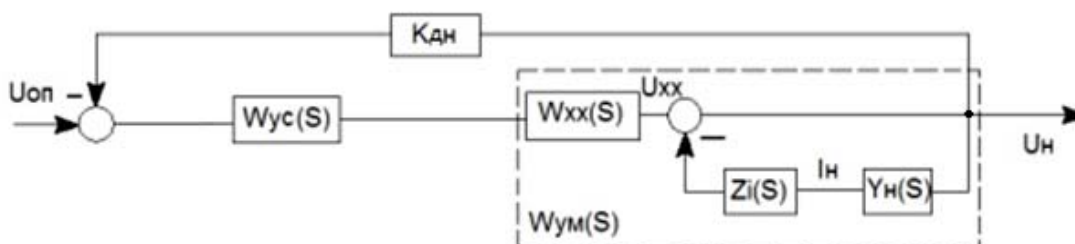


Рис. 1. Функциональная схема непрерывного стабилизатора напряжения



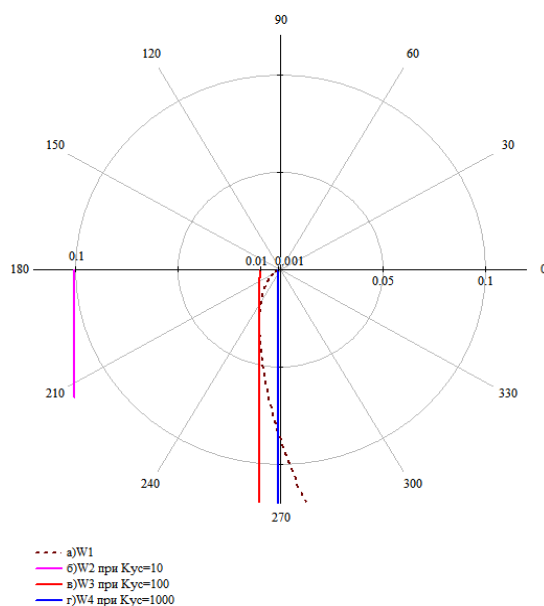


Рис. 2. Амплитудно-фазовые характеристики

Исходя из функциональной схемы, составлена ПФ разомкнутого контура НСТ

$$W_{\text{рк}}^{\text{н}}(s) = \frac{W_{\text{yc}}(s) \cdot W_{\text{xx}}(s) \cdot K_{\text{дн}}}{1 + Z_i(s) \cdot Y_{\text{н}}(s)},$$

где  $W_{\text{xx}}(s)$  – ПФ холостого хода усилителя мощности (УМ);  $K_{\text{дн}}$  – коэффициент датчика напряжения;  $Y_{\text{н}}(s)$  – полная комплексная проводимость (адмитанс) нагрузки;  $Z_i(s)$  – полное комплексное сопротивление (импеданс) [1].

Рассмотрим анализ устойчивости НСН с помощью модифицированного критерия Найквиста. Представим характеристическое уравнение замкнутой системы в виде

$$W_{\text{xx}}(j\omega) \cdot K_{\text{дн}} = -\frac{1}{W_{\text{yc}}(j\omega)} = -\left(K_{\text{oc}} + j \frac{T_{\text{oy}}}{K_{\text{oy}}} \omega\right).$$

Для анализа устойчивости разомкнутой системы НСН построим амплитудно-фазовые характеристики (АФХ) (рис. 2) левой  $W_1(j\omega) = W_{\text{xx}}(j\omega) \cdot K_{\text{дн}}$  и правой

части  $W_2(j\omega) = -\left(K_{\text{oc}} + j \frac{T_{\text{oy}}}{K_{\text{oy}}} \omega\right)$  – уравнения при

разных значениях коэффициента  $K_{\text{oc}}$  [2].

Поскольку параметры  $K_{\text{oy}}$  и  $T_{\text{oy}}$  для конкретного типа ОУ неизменны, то АФХ  $W_2(j\omega)$  правой части выражения представляет собой на комплексной плоскости (рис. 2) прямую линию, параллельную оси ординат, а при различных значениях коэффициента  $K_{\text{oc}}$  и, соответственно, коэффициента  $K_{\text{yc}}$  – семейство таких прямых.

Для обеспечения устойчивости системы управления НСН годограф АФХ  $W_1(j\omega)$  не должен пересекать прямую линию, соответствующую требуемому

значению  $K_{\text{yc}}$  УС. По рис. 2 видно, что предельной величиной является  $K_{\text{yc}} = 100$ . При дальнейшем увеличении  $K_{\text{yc}}$  НСН станет неустойчивым и потребуются введение корректирующих устройств. Таким образом, для анализа влияния динамики УС на устойчивость НСН достаточно знания величины только одного параметра – коэффициента обратной связи  $K_{\text{oc}}$  УС.

Разработанная методика исследования устойчивости стабилизирующего источника питания модифицированным методом Найквиста позволяет упростить процедуру анализа и сократить время, необходимое для проведения анализа устойчивости стабилизирующих источников питания с операционными усилителями.

#### Библиографические ссылки

1. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1991.
2. Попов Е. П. Теория автоматического управления. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М. : Наука, 1989.

#### References

1. Gusev V. G., Gusev Yu. M. *Elektronika. Uchebnoe posobie dlya priborostroitel'nykh vuzov* [Electronics. Textbook for Instrument-Making Universities]. 2e izd. recycled and supplemented. Moscow, Higher School, 1991.
2. Popov E. P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory of automatic control. Theory of linear systems of automatic regulation and control]. Moscow, Science, 1989.

© Мизрах Е. А., Колохматова С. А.,  
Соболева Т. С., 2019

УДК 621.37

## ДВУХЗЕРКАЛЬНАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ АНТЕННА С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПРОФИЛЯМИ РЕФЛЕКТОРА И КОНТРЕФЛЕКТОРА

Т. С. Осипенко, Ю. В. Крылов, В. Н. Преснов

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Osipeenko987@gmail.com

*Рассмотрены результаты моделирования двухзеркальной антенны по схеме Кассегрена. Показана возможность увеличения коэффициента усиления антенны в требуемой зоне обслуживания за счет синтеза профилей рефлектора и контррефлектора с сохранением номинальных габаритных размеров антенны.*

*Ключевые слова: двухзеркальная антенна, антенна КА, модифицированный профиль рефлектора и контррефлектора.*

## AXISYMMETRIC DUAL-REFLECTOR ANTENNA WITH A SPECIAL PROFILE OF SUBREFLECTOR

T. S. Osipenko, Y. V. Krylov, V. N. Presnov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Osipeenko987@gmail.com

*The article reflects the possibility of applying the dual-reflector antenna with a special subreflector profile to the satellite communications. In the article compared characteristics of the classic profile and modified profile of subreflector.*

*Keywords: Radio engineering, antenna-feeder devices, dual-reflector antenna, subreflector special form.*

**Введение.** На сегодняшний день антенны КА наиболее широко представлены в сегменте зеркальных антенн, которые состоят из источника первичной волны (облучателя) и одного или нескольких зеркал, преобразующих сферический фронт волны в плоский. Наиболее компактной и оптимальной (в случае необходимости перенацеливания), по сравнению с однозеркальной оптической схемой, является двухзеркальная антенна по схеме Кассегрена. Кроме компактности конструкции к современным антеннам КА предъявляются достаточно жесткие требования к их радиотехническим характеристикам в частности к коэффициенту усиления (КУ).

Необходимо отметить, что в зависимости от назначения антенны в некоторых случаях предъявляется требование – получение максимального КУ не по оси диаграммы направленности антенны, а в требуемой зоне обслуживания (ЗО). Вследствие чего необходимо рассмотреть возможность применения специального профиля как рефлектора, так и контррефлектора [1] на примере антенны, разработанной для перспективного КА.

**Конструкция антенны.** В соответствии с заданными требованиями в первом приближении была рассчитана осесимметричная двухзеркальная приемо-передающая антенна Ка-диапазона по схеме Кассегрена (рис. 1) [2–4]. Рефлектор антенны представлял собой параболоид вращения с диаметром 1400 мм и

фокусным расстоянием 480 мм, контррефлектор – классический гиперболоид вращения диаметром 175 мм. Для получения максимально возможного КУ в требуемой ЗО был проведен синтез профиля как рефлектора антенны, так и профиля контррефлектора по заданным целевым значениям характеристик КУ и КПП в ЗО. Синтез проводился в специализированном ПО POS, предназначенном для расчета антенн с контурной ДН.

В качестве облучателя приемо-передающей антенны использовался гофрированный конический рупор с частотно-поляризационным селектором [5] имеющим достаточно компактные размеры для минимизации затенения рефлектора антенны.

В результате расчета антенны в ПО GRASP на частоте 30 ГГц были получены ДН (в картографической проекции), представленные на рис. 2 и 3.

**Анализ полученных результатов и выводы.** В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод, что синтезированные профили как рефлектора, так и контррефлектора относительно их классического исполнения – параболического и гиперболического соответственно, позволяют улучшить энергетику в ЗО до 0,6 дБ, благодаря синтезу амплитудно-фазового распределения токов на поверхности рефлектора и контррефлектора в соответствии с заданными исходными целевыми параметрами при моделировании в ПО POS.

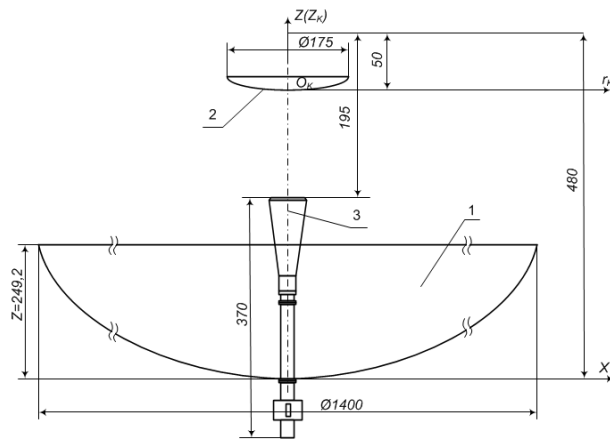


Рис. 1. Габаритный эскиз антенны со специальным профилем контррефлектора:  
1 – рефлектор; 2 – контррефлектор; 3 – облучатель

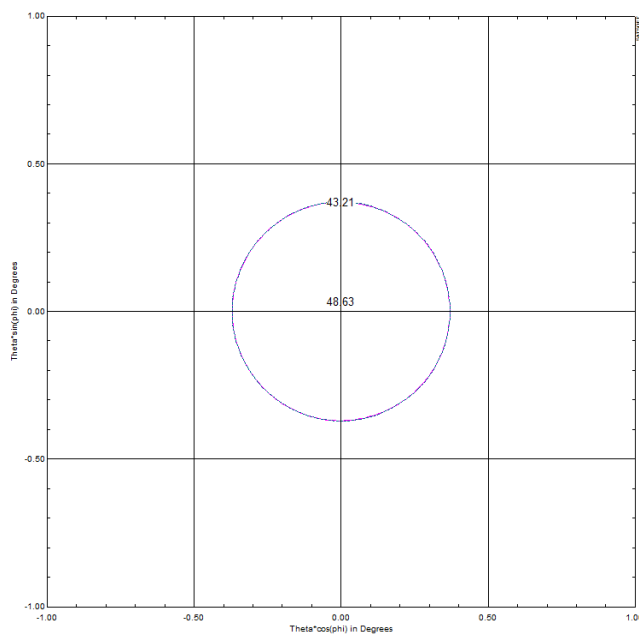


Рис. 2. КУ антенны в пределах требуемой ЗО (КУ<sub>макс</sub> – 48,6 дБ)

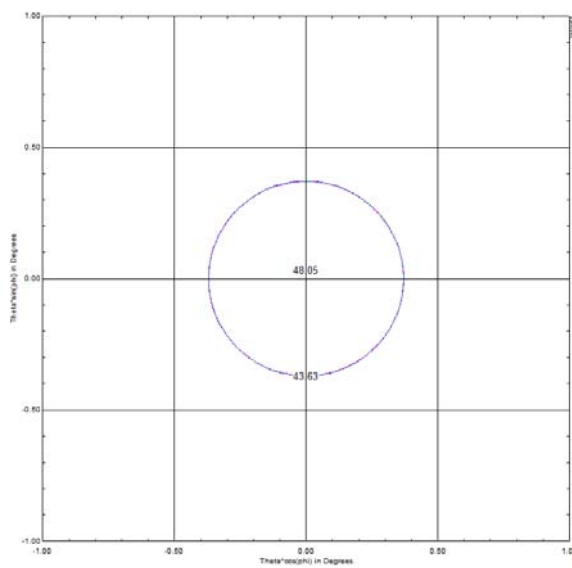


Рис. 3. КУ антенны со специальными профилями рефлектора и контррефлектора в пределах требуемой ЗО (КУ<sub>макс</sub> – 48,0 дБ)

**Библиографические ссылки**

1. Зубарев Р. С., Крылов Ю. В., Лапин А. Ю. Двухзеркальная осесимметричная антенна со специальным профилем контррефлектора // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2015. С. 228–230.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высшая школа, 1988. С. 385–394.
3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. Ч. 2. М. : Связь, 1977. 288 с.
4. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн. М. : Радио и связь, 1984. 208 с.
5. Пат. № 2647203, Российская Федерация. Частотно-поляризационный селектор / Крылов Ю. В., Першин А. С., Романов А. Г., Данилов И. Ю. ; заявитель и патентообладатель «РОСКОСМОС», АО «ИСС». № 2016132916, заявл. 09.08.2016, опубл. 14.03.2018.

**References**

1. Zubarev R. S., Krylov Yu. V., Lapin A. Yu. Dvukhzerkal'naya osesimmetrichnaya antenna so spetsial'nym profilem kontrreflektora // Reshetnevskiyechteniya: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 55-letiyu Sib. gos. aerokosmich. un-ta im. akad. M. F. Reshetneva (10–14 noyab. 2015, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch. / pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. 2015. P. 228–230.
2. Sazonov D. M. Antenny i ustroystva SVCH. Moscow, Vysshaya shkola, 1988. P. 385–394.
3. Ayzenberg G. Z., Yampol'skiy V. G., Tereshin O. N. Antenny UKV. Ch. 2. Moscow, Svyaz', 1977. 288 p.
4. Vud P. Analiz i proyektirovaniye zerkal'nykh antenn. Moscow, Radio i svyaz', 1984. 208 p.
5. Pat. № 2647203, Rossiyskaya Federatsiya. Chastotno-polyarizatsionnyy selektor / Krylov Yu. V., Pershin A. S., Romanov A. G., Danilov I. Yu.; zayavitel' i patentoobladatel' "ROSKOSMOS", AO "ISS". № 2016132916, zayavl. 09.08.2016, opubl. 14.03.2018.

© Осипенко Т. С., Крылов Ю. В.,  
Преснов В. Н., 2019

УДК 681.78

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ МАКЕТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

А. А. Поздняков, В. О. Князев, Ю. Ю. Мальков, С. А. Шамунов, А. В. Киселёв

АО «Научно-производственное предприятие «Геофизика-Космос»,  
Российская Федерация, 107497, г. Москва, ул. Иркутская, д. 11. корп. 1  
E-mail: 1102@geocos.ru

*Предложен вариант программно-аппаратного макета звёздного прибора (на примере звёздного датчика). Макет позволяет проводить наземную экспериментальную отработку системы ориентации и стабилизации КА без использования реальных приборов и их КПА. Использование таких средств позволяет снизить стоимость и трудоёмкость наземной отработки КА.*

*Ключевые слова: звёздный датчик, наземная экспериментальная отработка, программно-аппаратный макет.*

## SOFTWARE-HARDWARE STAR TRACKER TEST SAMPLE FOR IN EARTH VALIDATION OF ORIENTATION AND STABILIZATION SYSTEMS

A. A. Pozdniakov, V. O. Knyazev, Y. Y. Malkov, S. A. Shamunov, A. V. Kiselev

JSC “Scientific & Production Enterprise “Geofizika-Cosmos”  
11-1, Irkutskaya Str., Moscow, 107497, Russian Federation  
E-mail: 1102@geocos.ru

*Software-hardware star tracker test sample is described in this article. Such kind of test equipment allows to provide AOCS validation without protoflight units. Such approach saves time and money.*

*Keywords: star tracker, AOCS, test model, engineering unit, in Earth validation.*

Наземная экспериментальная отработка (НЭО) традиционно является одной из важнейших задач при создании космических аппаратов (КА). В рамках НЭО, отработка алгоритмического и программного обеспечения и логики взаимодействия бортовой аппаратуры (БА) на системном уровне требует значительной номенклатуры аппаратных средств – в первую очередь технологических изделий составных частей БА и их контрольно-проверочной аппаратуры (КПА).

В состав системы ориентации и стабилизации (СОС) входят оптико-электронные приборы – Звездные, Солнечные и Земные датчики. Особенность этих приборов состоит в том, что для проверки их функционирования требуется имитация наличия в поле зрения прибора соответствующих небесных тел. Такие задачи, безусловно, решаются средствами стендового и имитационного оборудования, которое имеется или специально создается у производителя оптико-электронных приборов. Однако задачи изготовления и НЭО в составе СОС несколько отличаются, с учетом этого у имеющегося наземного оборудования можно выделить несколько существенных недостатков:

– для высокоточных стендов: сложность, массивность, дороговизна, необходимость специфических инженерно-строительных решений и др.;

– для компактных имитаторов: в первую очередь невысокая точность имитации, как в части угловых, так и энергетических параметров. К тому же стоимость некоторых образцов имитаторов также бывает весьма существенной;

– для всех решений: сложности и ограничения имитации углового движения КА, фоновой и помеховой обстановки, ограниченность имитации аппаратных отказов и сбоев в работе приборов.

Кроме того следует понимать, принципиальную невозможность идеального воспроизведения условий внешнего воздействия – как минимум в силу случайного характера погрешностей приборов и наземного оборудования.

Идея создания аппаратуры, позволяющей провести качественную НЭО, но при этом лишенной указанных выше недостатков, привела к созданию программно-аппаратных макетов (ПАМ) звездных датчиков 361К и 362К.

В рамках СЧ ОКР «Создание аппаратуры астрокоррекции для высокоточной бортовой навигационной системы» (ВБНС-АК) по заказу АО «НПО автоматики» разработан и изготовлен ПАМ трех звездных приборов (ПЗВ) – двух ПЗВ 362К [1,2] и одного 361К [3; 4]. Приведем краткое описание конкретной реализации ПАМ.

В состав ПАМ входит ПК и до четырех (опционально) программно-аппаратных эквивалентов приборов. ПК ПАМ принимает данные об ориентации СК КА в инерциальной системе координат от автоматизированного испытательного комплекса СОС. Программно-аппаратные эквиваленты подключаются непосредственно к СОС и являются окончательными устройствами. Структурная схема ПАМ приведена на рис. 1.

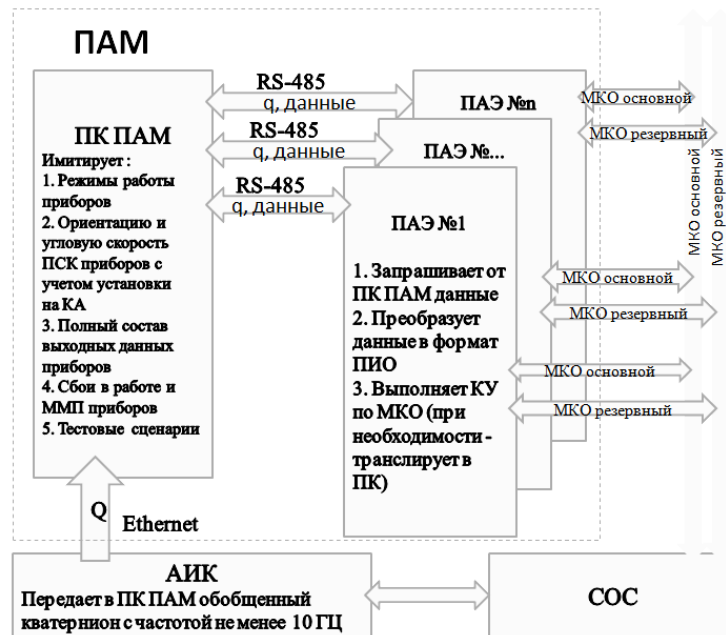


Рис. 1. Структурная схема ПАМ



Рис. 2. ПАМ приборов 361К и 362К для СЧ ОКР «ВВНС-АК»

Аппаратно 361К-ПАМ и 362К-ПАМ идентичны и состоят из вычислительно-интерфейсного устройства (ВИУ), вторичного источника питания (ВИП) и блока имитации работы термоэлектрического охладителя (ИТЭМО). ВИУ обеспечивает взаимодействие с ПК ПАМ и СОС по ГОСТ Р 52070. Циклограмма обновления данных и протокол информационного обмена (ПИО) ПАМ с СОС в части целевой информации идентичны штатным приборам 361К и 362К.

В ПО ПАМ реализован режим перезаписи ПЗУ - это позволяет не только заменить ПО в связи с выходом обновления, но и безопасно отработать важнейший «аварийный» режим функционирования.

Потребляемая мощность при напряжении питания от 24 до 32,5 В приблизительно соответствуют энергопотреблению штатных приборов (для 362К-ПАМ не более 4,5 Вт, а для 361К-ПАМ не более 7 Вт за счет загрузки процессора ВИУ вычислительными задачами).

В ПК ПАМ заложены следующие функции:

– прием от испытательного комплекса данных об ориентации КА в ГСК (или ИСК текущей эпохи), на

основе которых вычисляется кватернион ориентации каждого имитируемого прибора с учетом параметров привязки к КА (привязка задается в настройках);

– имитация штатной информации с учетом упрощенной математической модели погрешностей звездного прибора, а при необходимости повышенных погрешностей определения ориентации, в том числе в зависимости от угловой скорости;

– возможность имитации сбойных ситуаций и отказов, характерных для имитируемого прибора. Циклограмма формирования сбойных ситуаций закладывается в файлах-сценариях или задается в составе данных, получаемых по Ethernet.

Таким образом, ПАМ позволяет проводить полноценную отработку, исследование и верификацию:

– информационно-логического взаимодействия СОС и ПЗВ;

– программно-математического обеспечения СОС;

– детектирование и парирование нештатных ситуаций в работе ПЗВ;

– точностных и динамических характеристик СОС.

Для обеспечения максимально качественной НЭО СОС программно-аппаратные эквиваленты отвечают требованиям к электромагнитной совместимости (пульсации, эмиссия, помехи), предъявляемым к штатным приборам 361К и 362К. Типы соединителей также соответствуют штатным. Фотография ПАМ (без ПК) приведена на рис. 2.

Дальнейшее развитие ПАМ предполагается вести в направлении доработки ПО для имитации не только звездных приборов, но и Солнечных и Земных датчиков. В результате один ПАМ будет способен имитировать целый ряд приборов АО «НПП «Геофизика-Космос». При необходимости, количество имитируемых приборов может быть увеличено до восьми. В случае смены приборного состава достаточно будет только загрузить другое ПО в программно-аппаратные эквиваленты, установить соответствующие кабель – переходники для соответствующего прибора и выбрать модель имитируемого датчика в окне настроек ПО ПК ПАМ.

К безусловным преимуществам ПАМ следует отнести:

– низкую стоимость комплекта, имитирующего до четырех (восьми) оптико-электронных приборов (даже по сравнению с одним технологическим прибором с КПА);

– возможность резкого уменьшения номенклатуры средств для НЭО, снижение трудоемкости разработки методик, ПО, подготовки и проведения испытаний;

– полноту и удобство отладки ПО СОС (возможности имитации не ограничены оборудованием, обеспечивается полная повторяемость вычислений и т. п.).

#### Библиографические ссылки

1. Мальков Ю. Ю. Конструктивные особенности перспективного малогабаритного прибора ориентации по звездам 362К // IV Научно-техническая конференция молодых специалистов / АО «ИСС». Железнодорожск, 2017.

2. Шамунов С. А. Электрические особенности перспективного малогабаритного прибора ориентации по звездам 362К // IV Научно-техническая конференция молодых специалистов / АО «ИСС». Железнодорожск, 2017.

3. Мальков Ю. Ю., Поздняков А. А., Шамунов С. А. Конструктивные особенности перспективного прибора ориентации по звездам 361К // Инновационный

арсенал молодежи : труды восьмой науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб. : Инфо-да, 2017.

4. Шамунов С. А., Поздняков А. А., Мальков Ю. Ю. Перспективный прибор ориентации по звездам на отечественной элементной // Инновационный арсенал молодежи : труды восьмой науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб. : Инфо-да, 2017.

5. Рябогин Н. В., Кошелев А. Ю., Пронина Е. Б. Методика отработки системы визуальной навигации и детектирования угроз, разработанной на базе унифицированных функциональных модулей // Современные проблемы ориентации и навигации КА : сборник VI всероссийской науч.-техн. конф. / Таруса. М. : ИКИ РАН, 2019.

#### References

1. Malkov Y. Y. *Konstruktivnie osobennosti perspektivnogo malogabaritnogo pribora orientacii po zvezdam 362K* [Design features of the perspective compact star tracker 362K] // *IV Nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodyh specialistov* [IV Scientific & technical conference of young specialists]. Zheleznogorsk, 2017.

2. Shamunov S. A. *Elektricheskie osobennosti perspektivnogo malogabaritnogo pribora orientacii po zvezdam 362K* [Electrical features of the perspective compact star tracker 362K] // *IV Nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodyh specialistov* [IV Scientific & technical conference of young specialists]. Zheleznogorsk, 2017.

3. Malkov Y. Y., Pozdnyakov A. A., Shamunov S. A. [Design features of the perspective star tracker 361K] // *Innovative reserve young specialists: materials VIII scientific & technical conference*. Saint-Petersburg : Infoda, 2017.

4. Shamunov S. A., Pozdnyakov A. A., Malkov Y. Y. [Design features of the perspective star tracker 361K] // *Innovative reserve young specialists: materials VIII scientific & technical conference*. Saint-Petersburg, Infoda, 2017.

5. Ryabogin N. V., Koshelev A. Yu., Pronina E. B. [Method of testing the visual navigation and hazard detection system, designed on the basis of unified functional modules] // *Modern problems of spacecraft orientation and navigation: materials VI scientific & technical conference* / Tarusa. Moscow, IKI RAN, 2019.

© Поздняков А. А., Князев В. О., Мальков Ю. Ю., Шамунов С. А., Киселёв А. В., 2019

УДК 681.532.5+681.58

## ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИЛОВОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Д. С. Положенцев

АО «Научно-исследовательский институт командных приборов»  
Российская Федерация, 198216, г. Санкт-Петербург, Трамвайный проспект, 16  
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Российская Федерация, 190000, г. Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67  
E-mail: pds6476564@yandex.ru

*Представлены результаты частотного анализа двухдатчиковой системы управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса системы управления движением космического аппарата.*

*Ключевые слова: исполнительный электропривод, силовой гироскопический комплекс, система управления угловой скоростью, частотный анализ, обратная связь по угловому положению, система управления движением космического аппарата.*

## FREQUENCY ANALYSIS OF A TWO-SENSOR CONTROL SYSTEM OF THE CONTROL MOMENT GYROSCOPE ELECTRIC DRIVE

D. S. Polozhentcev

JSC “Command Devices Research Institute”  
16, Tramvaynyy Av., Saint-Petersburg, 198216, Russian Federation  
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
67, B. Morskaya Str., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation  
E-mail: pds6476564@yandex.ru

*This paper presents the results of a frequency analysis of a two-sensor control system of a spacecraft motion control system control moment gyroscope electric drive.*

*Keywords: electric drive, control moment gyroscope, angular velocity control system, frequency analysis, angle feedback, control systems movement of space satellite.*

Силовой гироскопический комплекс (СГК) это устройство, применяемое, как правило, в качестве исполнительного органа в системах управления движением (СУД) космических аппаратов (КА) [1]. Управляющий момент, создаваемый СГК, определяется как векторное произведение кинетического момента ротора гиromотора на угловую скорость поворота его подвеса [2]. Стабильность модуля кинетического момента ротора может быть обеспечена с точностью до десятых долей процента, поэтому точность реализации управляющего момента СГК определяется работой исполнительного электропривода (ИЭП), объектом управления которого является подвес гиromотора (ПГ) [3].

Современный ИЭП СГК, как правило, состоит из вентильного двигателя, одноступенчатого редуктора и расположенного на оси ПГ датчика угла, сообщающего информацию о направлении вектора кинетического момента в СУД КА и используемого для замыкания обратной связи по угловому положению. Принцип работы системы управления ИЭП основан на сравнении кодов текущего углового положения ПГ с опорным, вычисленным путем интегрирования кода задаваемой угловой скорости вращения ПГ, поступающего из СУД КА, и выдаче управляющих сигналов, со-

ответствующих скорректированной разнице этих кодов, на двигатель [4].

Минимальные значения задаваемой угловой скорости вращения ПГ могут достигать тысячных долей градуса в секунду. Чувствительность ИЭП, при обработке таких скоростей вращения, во многом определяется разрешающей способностью датчика угла, расположенного по оси ПГ, которая обычно не превышает 16–18 разрядов.

Для повышения чувствительности при обработке малых задаваемых скоростей вращения было предложено техническое решение об установке датчика угла на ось двигателя ИЭП для организации дополнительного контура обратной связи. Система управления такого электропривода функционирует в режиме попеременного замыкания контура обратной связи на датчики угла, расположенные на осях ПГ, и ротора двигателя [5].

На рис. 1 представлена функциональная схема механической части ИЭП СГК, где  $M_{дв}$  – момент двигателя;  $W_{мд}(s)$  – передаточная функция механической части двигателя;  $\alpha_{дв}$  – угловое положение ротора двигателя;  $K_p$  – передаточный коэффициент редуктора;  $C$  – коэффициент угловой жесткости;  $W_{пг}(s)$  – передаточная функция ПГ;  $\alpha_{пг}$  – угловое положение ПГ.



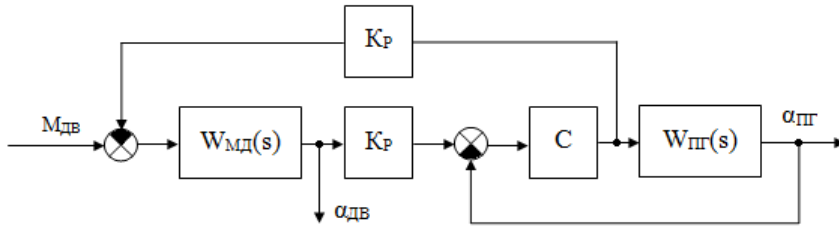


Рис. 1. Функциональная схема механической части ИЭП СГК

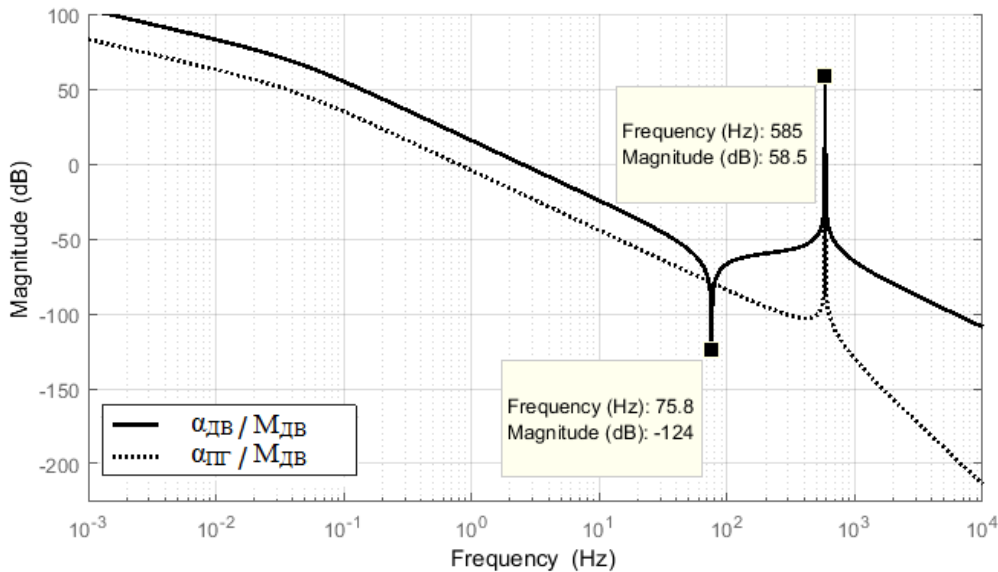


Рис. 2. ЛАЧХ механической части ИЭП СГК

Для сравнения двух систем управления ИЭП СГК было проведено исследование, показывающее влияние сигнала используемого для замыкания контура управления на их частотные характеристики. На рис. 2 приведены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) механической части ИЭП СГК, где входным сигналом является  $M_{дв}$ , а выходными –  $\alpha_{дв}$  и  $\alpha_{пг}$ .

Видно, что использование, в качестве сигнала обратной связи, углового положения ротора двигателя приводит к повышению общего коэффициента усиления системы, по сравнению с «классическим вариантом» построения ИЭП СГК. При этом частота резонанса, обусловленная влиянием угловой жесткости, не изменяется. Вместе с этим наблюдается значительное ослабление коэффициента усиления на определенной частоте (форсирующее звено второго порядка). Учитывая, что управляющие (вызванные сменой задаваемой угловой скорости вращения ПГ) и возмущающие (вызванные вращением КА) воздействия ИЭП СГК происходят на частотах менее 10 Гц, это ослабление не сказывается на качестве работы системы. Тем не менее, этот факт необходимо учитывать при синтезе средств коррекции системы управ-

ления ИЭП СГК и уделять ему особое внимание при проведении математического моделирования подобных систем.

#### Библиографические ссылки

1. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. Бортовые системы управления космическими аппаратами : учеб. пособие. М. : МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
2. Сорокин А. В. Электромеханические исполнительные органы для систем ориентации малых космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 1998. № 4. С. 81–88.
3. Яковец О. Б. Математическое моделирование процессов управления силовыми гироскопическими приборами // Завалишинские чтения 2009 : сб. докл. СПб. : ГУАП, 2009. С. 196–201.
4. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод гиродина // Электронные и электромеханические системы и устройства : сборник научных трудов. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. С. 301–306.
5. Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод перспек-

тивного силового гироскопического комплекса // Доклады ТУСУР. 2018. № 3 (21). С. 103–108.

### References

1. Brovkin A. G., Burdygov B. G., Gordiyko S. V. *Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie* [Onboard Spacecraft Control Systems: Tutorial]. Moscow, MAI-PRINT, 2010, 304 p.

2. Sorokin A. V. [Electromechanical executive bodies for small spacecraft orientation systems]. *Gyroscopy and navigation*. 1998. № 4. P. 81–88 (In Russ.)

3. Yakovets O. B. [Mathematical modeling of control processes for power gyroscopic devices. *Proc. report*

*scientific and technical conf. Zavalishin's Rreading*]. SPb., 2009. P. 196–201 (In Russ.)

4. Polozhentsev D. S., Dzhukich D. J. [Executive electric drive gyrodine]. *Electronic and electromechanical systems and devices: collection of scientific papers*, Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2016, P. 301–306 (In Russ.)

5. Yakimovsky D. O., Polozhentsev D. S., Dzhukich D. Y. [Perspective control moment gyroscope electric drive]. *Proceedings of TUSUR University*. 2018. № 3. P. 103–108 (In Russ.).

© Положенцев Д. С., 2019

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Е. Н. Шестаков, Т. С. Осипенко

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: osipeenko987@gmail.com

*Рассматривается вопрос оперативного расчета диаграммы направленности рупорной антенны в среде MATLAB по известным параметрам, таким как размер апертуры и амплитудно-фазовое распределение.*

*Ключевые слова: антенна, диаграмма направленности, MATLAB, ближнее поле.*

## MATH MODELING OF HORN ANTENNA PARAMETERS BY MEASUREMENTS IN NEAR-FIELD

E. N. Shestakov, T. S. Osipenko

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: osipeenko987@gmail.com

*In paper we consider the problem of the operational calculation of the horn antenna pattern in the MATLAB environment by known parameters, such as the aperture size and the amplitude-phase distribution.*

*Keywords: antenna, directional pattern, MATLAB, near-field.*

Цель, достигаемая программой, заключается в расчете пространственной диаграммы направленности по данным амплитудно-фазового распределения. Для достижения цели, решаются следующие задачи:

- загрузка амплитудного и фазового распределений в рабочую среду;
- приведение амплитудного и фазового распределений к комплексной форме вида  $A = i\varphi$ , где  $A$  – амплитуда сигнала;  $\varphi$  – фаза сигнала;
- вычисление спектра плоских волн;
- вычисление составляющих поля в дальней зоне;
- вычисление суммарного поля в дальней зоне;
- построение графика пространственной диаграммы направленности.

В соответствии с задачей, предлагается следующий алгоритм в блок-схемы (рис. 1)

### 1. Пошаговый разбор программы

Программа для расчета диаграммы направленности антенны состоит из трех основных частей:

1. Объявление всех постоянных и переменных значений:

- загрузка исходных данных амплитуды и фазы в рабочую среду;
- объявление массивов, эквивалентных плоскости сканирования;
- вычисление постоянных (длина волны, волновое число и т. д.);

– объявление массивов пространственных углов  $\theta$  и  $\varphi$ ;

- преобразование амплитуды и фазы в амплитудно-фазовое распределение в комплексной форме;
- объявление размера массивов диаграммы направленности.

### 2. Циклы преобразования:

- переход от декартовой системы координат к сферической системе координат;
- получение спектра плоских волн при помощи операции преобразования Фурье над амплитудно-фазовым распределением;
- определение составляющих поля в дальней зоне.

### 3. Построение графика:

- Выделение сечений при  $\varphi = 90^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$ ;
- построение графиков пространственной диаграммы направленности в декартовой и полярной системах координат.

### 2. Результат работы программы

В результате работы программы отображается 2 графика: амплитудное распределение поля антенны в ближней зоне и нормированные диаграммы направленности антенны в декартовой при  $\varphi = 90^\circ$  (рис. 2).

Благодаря предложенному алгоритму, написана программа, позволяющая производить расчет пространственной диаграммы направленности по данным амплитудно-фазового распределения.

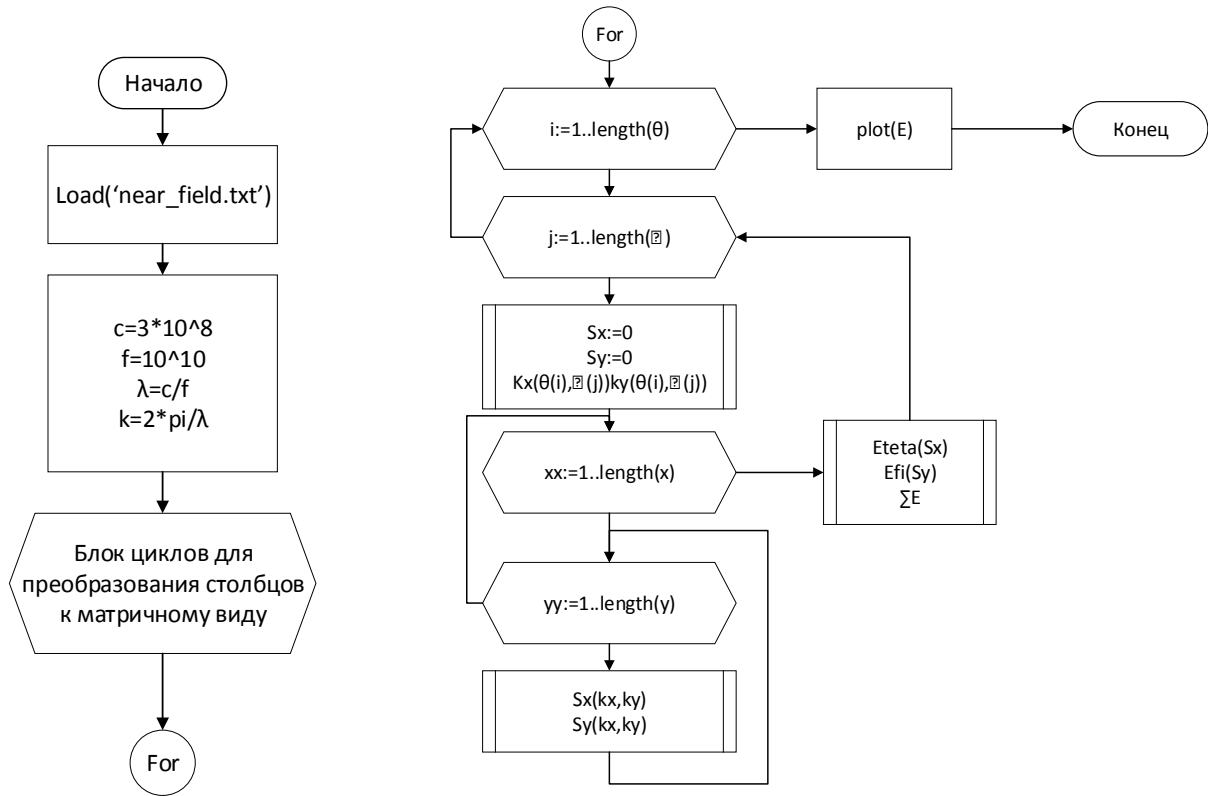


Рис. 1. Блок-схема программы

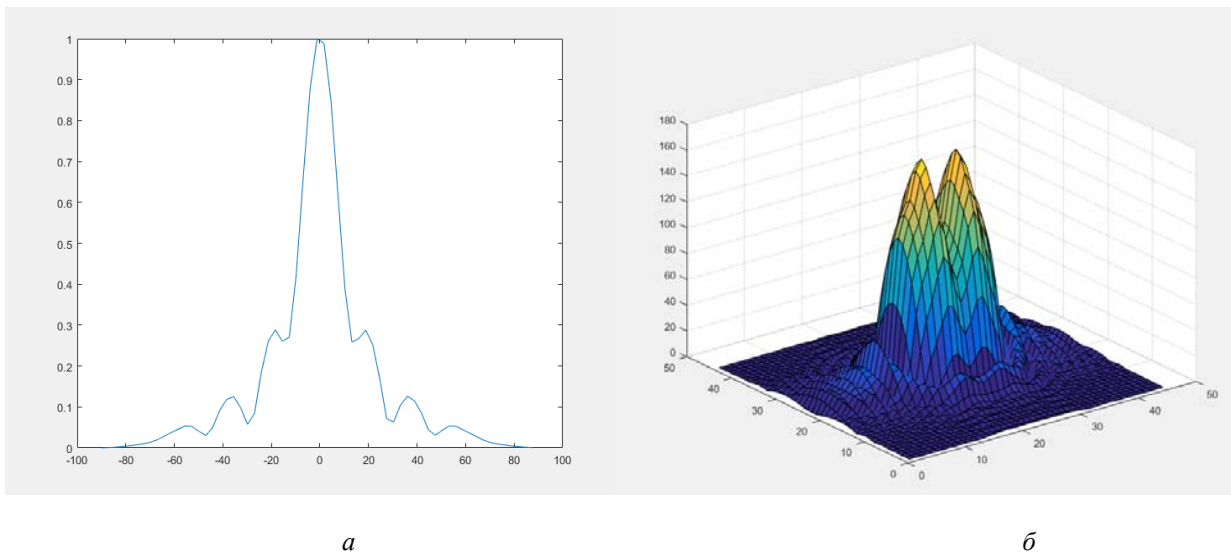


Рис. 2. Результаты измерений:  
 а – диаграмма направленности в декартовой системе координат ( $\varphi = 90^\circ$ );  
 б – амплитудное распределение поля в ближней зоне

**Библиографические ссылки**

1. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кремнецкий, А. П. Курочкин и др. Л. : Наука, 1985. 272 с.  
 2. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др. ;

под ред. Н. М. Цейтлина. М. : Радио и связь, 1985. 368 с. : ил.  
 3. Гошин Г. Г. Устройства СВЧ и антенны. Ч. 2. Антенны : учеб пособие. Томск : Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. 145 с.  
 4. Потемкин В. Г. Введение в Matlab. М. : Диалог-МИФИ, 2000. 256 с.

5. Эффективный метод обработки результатов измерений в ближней зоне антенн / А. Б. Хашимов // Антенны. 2014. № 1. С. 15–22.

#### References

1. Methods for measuring the parameters of radiating systems in the near zone / L. D. Barach, S. D. Kremetsky, A. P. Kurochkin et al. L. : Nauka, 1985. 272 p.

2. Methods for measuring the characteristics of microwave antennas / L. N. Zakharyev, A. A. Lemansky, V. I. Turchin et al. / Edited by M. N. Zeitlina. Moscow, Radio and Communications, 1985. 368 p.

3. Goshin G. G. Microwave devices and antennas. Part 2. Antennas: Tutorial. Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2012. 145 p.

4. Potemkin V. G. Introduction to Matlab. Moscow, Dialog-MEPHI, 2000. 256 p.

5. Khashimov A. B. An effective method for processing the results of measurements in the near zone of antennas // Antennas. 2014. № 1. P. 15–22.

© Шестаков Е. Н., Осипенко Т. С., 2019

УДК 621.311.69

## СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Н. В. Штабель, Л. А. Самотик, Е. А. Мизрах

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

*Авторами предложена система защиты системы электропитания космического аппарата от снижения сопротивления изоляции, повышенных токов и напряжений, а также образования дугового разряда в процессе наземных электрических испытаний. Произведен анализ макета устройства обнаружения дугового разряда, исследована работа макета в условиях воздействия помех на линию питания.*

*Ключевые слова: защитная автоматика, дуговой разряд, сопротивление изоляции, пробой, система электропитания, космический аппарат, испытания.*

## SPACECRAFT POWER SYSTEM PROTECTION COMPLEX FOR GROUND TESTS

N. V. Shtabel, L. A. Samotik, E. A. Mizrahk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shtabnik@gmail.com

*Authors proposed spacecraft power system protection complex providing overcurrent, overvoltage, reduced insulation resistance and arc fault protections during ground tests. Authors analyzed experimental arc fault detection device, studied device operability in noise conditions.*

*Keywords: protection devices, arc fault, insulation resistance, breakdown, power system, spacecraft, tests.*

Особенностью современных СЭП КА является соединение минусовой шины с корпусом СЭП, что позволяет устранить разность потенциалов между корпусом и токоведущими шинами и уменьшает вероятность пробоя сопротивления изоляции токоведущих шин и элементов СЭП на корпус вследствие накопления на нем потенциала [1]. При проведении наземных испытаний шина «минус» СЭП КА также присоединяется к корпусу СЭП и заземляется, при этом появление любого несанкционированного контакта между токоведущими элементами СЭП с плюсовым потенциалом и корпусом вызывает появление токов утечки, короткого замыкания или дугового разряда.

Все вышеперечисленные проблемы могут существенно осложнить и замедлить проведение наземных испытаний СЭП КА и даже привести к отказу различных подсистем СЭП КА. В настоящее время на рабочих местах испытаний СЭП КА используются различные защитные устройства, призванные обеспечить защиту оборудования от снижения сопротивления изоляции [2] или КЗ на корпус, обеспечить защиту линий от повышенных токов и напряжений [3]. Однако, устройств, обеспечивающих определение зажигания дугового разряда на линиях СЭП, не представлено.

Предлагаемая система комплексной защиты СЭП КА (СКЗ) выполняет все вышеперечисленные защитные функции одновременно, в том числе и защиту от

горения дуги. Структура предлагаемой СКЗ показана на рис. 1.

Блок защиты линий (БЗЛ) включает в себя датчики тока линии, напряжения, тока утечки, а также широкополосный датчик переменного тока для контроля дугообразования. СКЗ включает в себя БЗЛ низкой (токи до 20 А) и высокой (токи до 200 А) мощности. Методы контроля сопротивления изоляции и токов утечки, а также защиты от короткого замыкания шин на корпус с помощью ПТКЗ подробно описаны в работе [2].

Метод контроля дугообразования основан на анализе спектра тока линии при помощи датчика переменного тока БЗЛ. В частности, известно, что в процессе горения дуги в диапазоне частот от 10 кГц и выше появляются помехи высокой мощности [4]. Анализируя спектр сигнала датчика переменного тока можно отличить нормальную работу линии от аварийной ситуации. Для отработки метода определения дуги был собран испытательный стенд, схема которого показана на рис. 2. Дуга зажигалась при напряжениях источника питания 40...150 В, так как при меньших напряжениях дугообразование маловероятно [5].

Так как указанный метод определения дуги может давать ложные срабатывания при наличии импульсных источников, в схему была включена импульсная нагрузка в виде DC-DC преобразователя. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

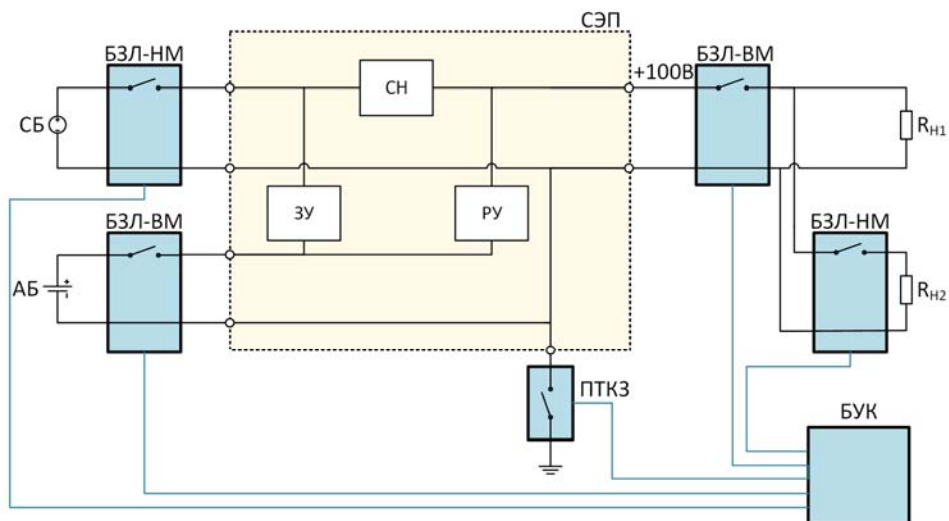


Рис. 1. Структура СЭП КА с системой комплексной защиты:  
 СБ – солнечная батарея; СН – стабилизатор выходного напряжения СЭП;  
 ЗУ – зарядное устройство; РУ – разрядное устройство; АБ – аккумуляторная батарея.  
 Блоки СКЗ: БЗЛ-НМ – блок защиты линии низкой мощности; БЗЛ-ВМ – блок защиты  
 линии высокой мощности; ПТКЗ – прерыватель тока короткого замыкания;  
 БУК – блок управления и контроля

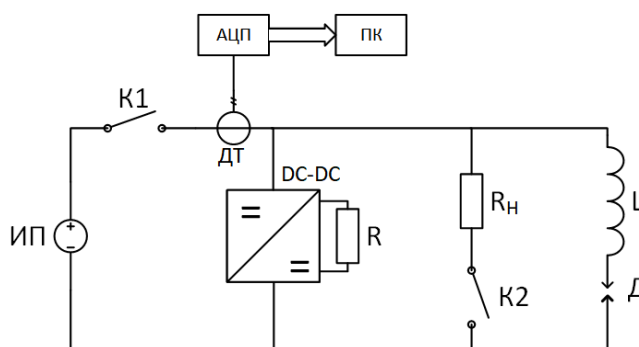


Рис. 2. Схема макета устройства дугообразования:  
 ИП – высоковольтный источник питания; К1, К2 – ключи;  
 ДТ – датчик переменного тока; Rн – имитатор нагрузки;  
 L – индуктивность; Д – дуговой разряд; АЦП – аналого-  
 цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер;  
 DC-DC – имитатор импульсного источника питания;  
 R – имитатор нагрузки

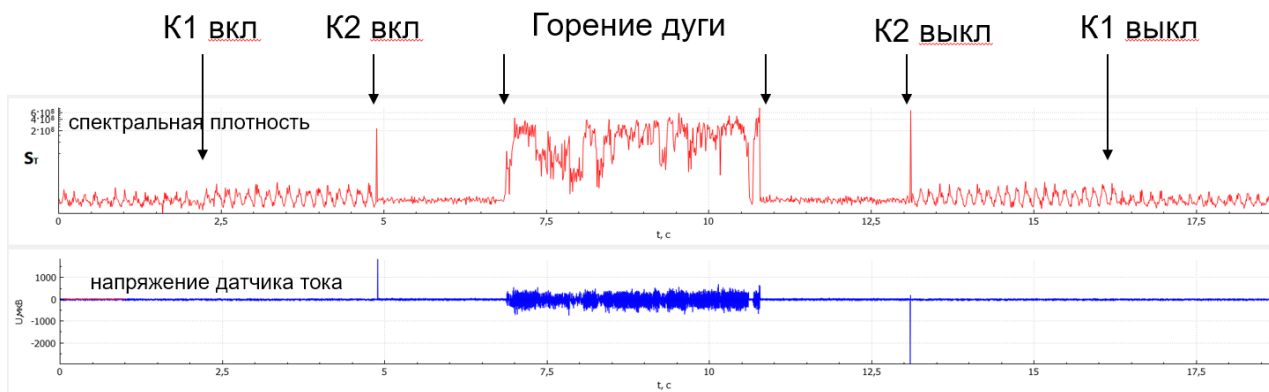


Рис. 3. Результаты экспериментального определения дугообразования

Из графика спектральной плотности на рис. 3 видно, что метод позволяет с достаточной достоверностью определить факт горения дуги на линии. В настоящее время ведутся работы по повышению быстродействия и фильтрации помех от ступенчатых воздействий (моменты включения ключа К2 на рис. 3), которые могут привести к ложным срабатываниям. Предлагаемая СКЗ универсальна и может использоваться на различных этапах разработки и испытаний СЭП КА.

#### Библиографические ссылки

1. Patel M. R. *Spacecraft Power Systems*. Taylor & Francis, 2004. 736 с.
2. Штабель Н. В., Мизрах Е. А., Ушаков А. В. Система контроля токов утечки и сопротивления изоляции для системы электропитания космического аппарата // *Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 1. 676 с.*
3. Пол. модель 134707U1 Российская Федерация, МПК H02H 5/00. Устройство защитного отключения электрической сети постоянного тока / Мизрах Е. А., Штабель Н. В., Копылов Е. А. ; № 2013126005/07 ; заявл. 05.06.2013 ; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. 2 с.
4. Сливков И. Н. *Электроизоляция и разряд в вакууме*. М. : Атомиздат, 1972. 304 с.
5. Bodeau M. Current and Voltage Thresholds for Sustained Arcs in Power Systems [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6104166> (дата обращения: 01.09.2019).

#### References

1. Patel M.R. *Spacecraft Power Systems*. Taylor & Francis, 2004. 736 p.
2. Shtabel' N. V., Mizrakh E. A., Ushakov A. V. [Spacecraft power supply system leakage current detection and insulation resistance measurement system] // *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016, P. 466–467 (In Russ.).
3. Mizrakh E. A., Shtabel N. V., Kopylov E. A. *Ustrojstvo zashhitnogo otklyucheniya e'lektricheskoy seti postoyannogo toka* [DC circuit protection device]. Utility model RF, no. 134707U1, 2013.
4. Slivkov I. N. *E'lektriozolyaciya i razryad v vakuume*. [Insulation and arc in vacuum]. Moscow, Atomizdat Publ., 1972, 304 p.
5. Bodeau M. Current and Voltage Thresholds for Sustained Arcs in Power Systems [Electronic resource]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6104166> (access: 01.09.2019).

© Штабель Н. В., Самотик Л. А.,  
Мизрах Е. А.. 2019



## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СООБЩЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ RFID-СИСТЕМЫ

Д. А. Шуринова, А. Н. Коваленко, А. В. Мурыгин, А. Г. Суворов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
 E-mail: dasha.shurinova@yandex.ru

Для объединения элементов двух автоматизированных пунктов управления в единую общающуюся систему с общей базой данных была разработана описываемая в данной статье система, представляющая собой сеть обмена данными между объектами управления.

Ключевые слова: RFID-система, сетевые переменные, программируемый логический контроллер.

## DEVELOPMENT OF A COMMUNICATION NET BETWEEN RFID SYSTEM ELEMENTS

D. A. Shurinova, A. N. Kovalenko, A. V. Myrygin, A. G. Suvorov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: dasha.shurinova@yandex.ru

To combine the elements of two automated control centers into a single communicating system with a common database, the system described in this article was developed. This system represents a data exchange network between control objects.

Keywords: RFID-system, network variables, programmable logical controller.

В данной статье рассматривается RFID-система [1] для автоматизации процессов на заводе холодильников. Данная система состоит из двух основных частей:

- 1) проверки совместимости холодильного шкафа с устанавливаемым на него компрессором;
- 2) автоматическое определение системой дозы хладагента, которую необходимо заправить в систему охлаждения холодильника.

Указанные части находятся на разных этажах производства, следовательно, нет возможности непосредственного подключения их друг к другу [2].

Для передачи данных от одного контроллера другому и отображения информации со всех контроллеров на панелях оператора все элементы системы объединяются в сеть посредством сетевого коммутатора (рис. 1).

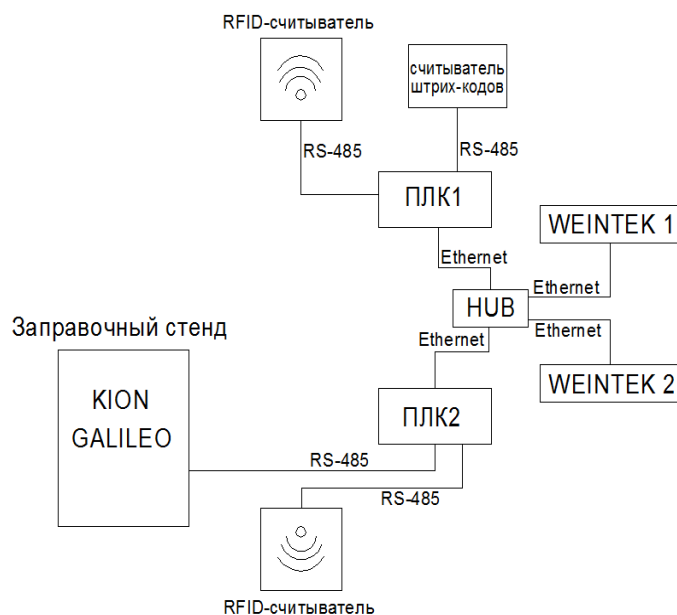


Рис. 1. Схема подключения элементов в системе

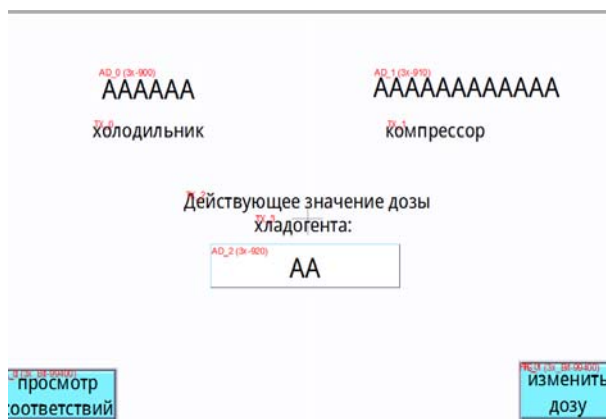


Рис. 2. Демонстрация характеристик холодильника, проезжающего рядом со стендом заправки



Рис. 3. Экран изменения существующего значения соответствующей дозы хладагента

Перед авторами статьи стояли следующие задачи: разработать программное обеспечение [3] для элементов системы таким образом, чтобы выполнялись данные условия:

- редактирование доз хладагента было возможно с обеих панелей оператора [4];
- перечни моделей холодильников и компрессоров, а так же массив соответствий хранятся в памяти только одного контроллера;

с помощью контроллера эмитировать считывание штрихкода и по считыванию информации с RFID-метки отправлять в заправочный стенд код для заправки необходимого количества хладагента.

Для возможности одновременного общения двух контроллеров с базой было решено использовать системные переменные, видимые одновременно в двух программах, таким образом панель оператора № 2 будет отображать базы данных из ПЛК1 и в то же время демонстрировать номер модели холодильника, имя компрессора и количество необходимого хладагента для модели, проезжающей перед ней по конвей-

еру в настоящий момент, полученные из ПЛК2 (рис. 2).

Также со второй панели можно изменять существующее значение дозы [5]. Все переменные, относящиеся к вводимым изменениям, являются сетевыми для обеспечения возможности передачи данных от одного ПЛК к другому.

Для передачи данных панелям используется протокол MODBUS (рис. 3). Программирование ПЛК производилось на языке ST (платформа программирования CoDeSys).

#### Библиографические ссылки

1. Electronic textbook [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID> (дата обращения: 14.07.2019).
2. Программирование программируемых логических контроллеров ПЛК110 Руководство пользователя.
3. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3 Редакция RU 2.4, для CoDeSys V2.3.6.x.

4. Руководство пользователя по программированию панели оператора WEINTEK в EasyBuilderPro версия 10.07.02.262.

5. Electronic textbook [Электронный ресурс]. URL: <http://www.weintek.net/easybuilderpro.html> (дата обращения: 10.07.2019).

#### References

1. Electronic textbook [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID> (accessed: 14.07.2019).

2. Programming PLC110 Programmable Logic Controllers User Manual.

3. PLC Programming User Guide for CoDeSys 2.3 Revision EN 2.4, for CoDeSys V2.3.6.x.

4. User Guide for programming WEINTEK operator panel in EasyBuilderPro version 10.07.02.262.

5. Electronic textbook [Electronic resource]. URL: <http://www.weintek.net/easybuilderpro.html> (access: 10.07.2019).

© Шуринова Д. А., Коваленко А. Н.,  
Мурыгин А. В., Суворов А. Г., 2019

## ПОДКЛЮЧЕНИЕ СТЕНДА ЗАПРАВКИ ХЛАДАГЕНТОМ К RFID-СИСТЕМЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

Д. А. Шуринова, А. Н. Коваленко, А. В. Мурыгин, А. Г. Суворов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [dasha.shurinova@yandex.ru](mailto:dasha.shurinova@yandex.ru)

*Для упрощения работы оператора на станции заправки компрессора холодильника хладагентом была разработана дополнительная RFID-система для автоматизации процесса. Данная система позволяет стенду заправки определить необходимую дозу хладагента без участия оператора.*

*Ключевые слова:* RFID-система, заправка хладагентом, заправочный стенд, компрессор.

## CONNECTION OF A FILLING STAND WITH RFID-SYSTEM AT REFRIGERATOR MANUFACTURE

D. A. Shurinova, A. N. Kovalenko, A. V. Myrygin, A. G. Suvorov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: [dasha.shurinova@yandex.ru](mailto:dasha.shurinova@yandex.ru)

*To simplify the work of the operator at the refrigerant compressor filling station of the refrigerator, an additional RFID system was developed to automate this process. This system allows the filling stand to determine the required dose of refrigerant without the participation of the operator.*

*Keywords:* RFID-system, refrigerant filling, filling station, compressor.

В настоящее время автоматизация процессов способствует развитию большинства отраслей промышленности, широко применяется в производстве, науке, ракетно-космической области. Всё чаще в проектах автоматизации процессов встречаются элементы с использованием RFID. RFID-система состоит из считывателя штрихкодов, считывателя RFID-меток [1], программируемого логического контроллера ПЛК ОВЕН [2; 3], панели оператора WEINTEK, сетевого концентратора для соединения всех элементов системы в единую сеть. Задачей данной системы является выявление ошибки совместимости компрессора с холодильным шкафом посредством считывания имени компрессора с его штрихкода, наклеенного на завод-изготовителе, и номера модели холодильного шкафа с RFID-метки. При нахождении несоответствия система оповещает оператора о неисправности. При отсутствии данной системы ошибка выявлялась только на стадии испытания холодильника. В таком случае рабочему приходилось снимать изделие с конвейера, отпаивать неподходящий компрессор и припаивать новый, что требовало дополнительных затрат труда и времени.

Разработкой, освещаемой в данной статье, является дополнение к существующей системе, состоящее из ещё одного программируемого логического контроллера, панели оператора и устройства считывания RFID-меток. Второй ПЛК будет подключаться к стенду заправки хладагентом GALILEO KION (см. рисунок).

Данная часть системы будет выполнять следующий алгоритм:

- считывание с RFID-метки имени компрессора, ранее считанного с его штрихкода и записанного в определённую область пользовательской памяти метки, отправка данных в ПЛК2;
- считывание с RFID-метки номера модели холодильника, отправка данных в ПЛК2;
- расшифровка полученной информации в ПЛК2 и отправка данных в ПЛК1 для определения дозы хладагента (все базы данных и соответствий хранятся в ПЛК1, к которому ПЛК2 имеет доступ через сеть);
- приём ПЛК1 информации о соответствующей данному сочетанию холодильник-компрессор дозы хладагента;
- отправка её в заправочный стенд (имитация штрихкода с количеством дозы).

Достоинства системы:

- упрощение работы оператора (раньше ему необходимо было вручную считывать штрихкод с заготовки, самостоятельно определив модель холодильника по наклеенному на него штрихкоду);
- автоматизация процесса;
- исключение вероятности ошибки оператора.

Недостатки системы:

- надёжность работы системы напрямую зависит от бесперебойного обмена информацией по сети.

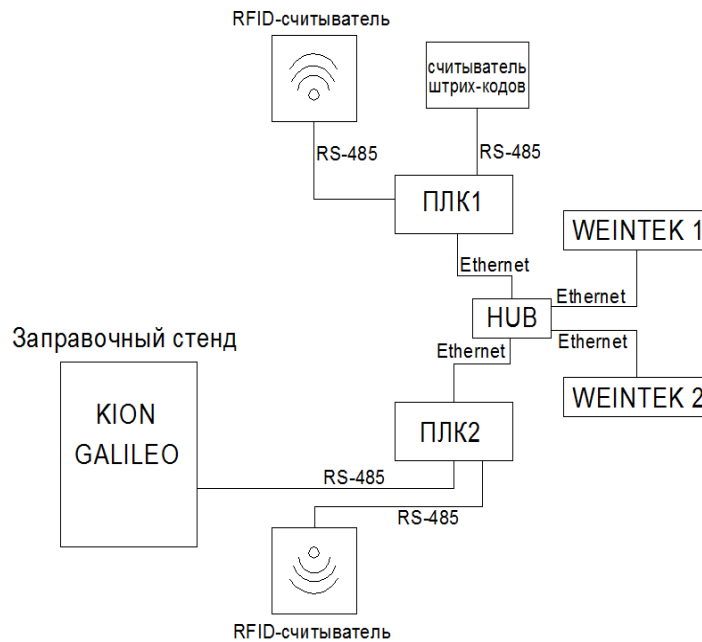


Схема подключения элементов в системе

#### Библиографические ссылки

1. Electronic textbook [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID> (дата обращения: 04.07.2019).
2. Программирование программируемых логических контроллеров ПЛК110 Руководство пользователя.
3. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3 Редакция RU 2.4, для CoDeSys V2.3.6.x.
4. Руководство пользователя по программированию панели оператора WEINTEK в EasyBuilderPro версия 5.07.02.262.
5. Electronic textbook [Электронный ресурс]: URL: <http://www.weintek.net/easybuilderpro.html> (дата обращения: 05.07.2019).

#### References

1. Electronic textbook [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID> (access: 04.07.2019).
2. Programming PLC110 Programmable Logic Controllers User Manual.
3. PLC Programming User Guide for CoDeSys 2.3 Revision EN 2.4, for CoDeSys V2.3.6.x.
4. User guide for programming WEINTEK operator panel in EasyBuilderPro version 5.07.02.262.
5. Electronic textbook [Electronic resource]: URL: <http://www.weintek.net/easybuilderpro.html> (access: 05.07.2019).

© Шуринова Д. А., Коваленко А. Н.,  
Мурыгин А. В., Суворов А. Г., 2019



**Секция**

**«КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»**

УДК 629.7.064.5

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. С. Васильев, О. А. Клишкин, С. Б. Сунцов, В. Г. Фризоргер

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: vasilyev\_is@sibmail.com

*Приведены результаты разработки технологии изготовления силовых модулей для системы электропитания космического аппарата. Вновь разработанная технология позволяет создавать силовые модули с высокой удельной мощностью.*

*Ключевые слова: силовые модули, система электропитания, космический аппарат, технология.*

## POWER MODULE MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR THE POWER SUPPLY SYSTEM OF SPACECRAFT

I. Vasilyev, O. Klimkin, S. Suntsov, V. Frizorger

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: vasilyev\_is@sibmail.com

*The article provides results develop of new technology for manufacturing of power module for power supply system of spacecraft. The new technology allow created power module with high power-to-weight ratio.*

*Keywords: power module, power system supply, spacecraft, technology.*

Важнейшая задача, решаемая при проектировании бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата с длительным сроком активного существования (до 15 лет), это обеспечение оптимальных тепловых режимов ЭРИ. Эта задача усложняется постоянным увеличением удельной тепловой мощности, выделяемой в модулях БА, что связано с уменьшением габаритов применяемых ЭРИ и, соответственно модулей. При этом применение печатных плат, на основе стеклотекстолитов, не позволяет обеспечить достаточный отвод тепла от ЭРИ, так как имеет удельную теплопроводность примерно 0,3 Вт/(м·К) [1].

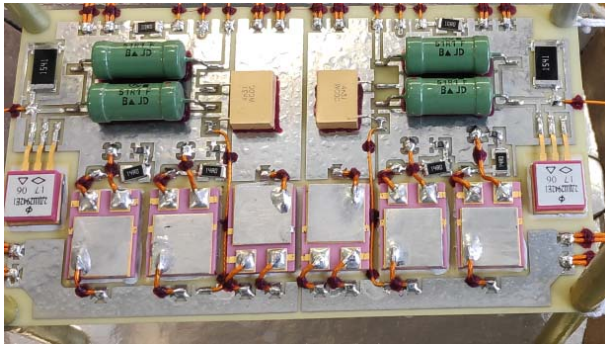
Данная проблема решается изготовлением силовых модулей (СМ), имеющих признаки печатных плат – топологию и возможность выполнения на неё монтажа электронных компонентов, но при этом теплопроводность должна быть в разы выше, чем у стеклотекстолита.

В настоящее время известны несколько технологий создания плат, которые обладают топологией и обеспечивают монтаж ЭРИ, но при этом теплопроводность примененных материалов в разы выше, чем у стеклотекстолита. К ним относятся платы, созданные на основе LTCC и DBC технологии. Подробное описание свойств и характеристик данных технологий приведено в публикациях [2–5]. Однако данные технологии имеют недостатки при применении в конструкции БА космических аппаратов, а именно различие коэффициентов температурного расширения алюминиевого основания и платы не позволяет осуществить жесткую фиксацию, кроме этого клеи или пасты, используемые при этом, имеют теплопроводность, не превышающую 3 Вт/(м·К), что также недостаточно для достижения необходимой эффективности.

Для достижения поставленных целей в АО «ИСС» была разработана перспективная конструкция силовых модулей с применением композиционных материалов, обладающая теплопроводностью от 20 до 100 Вт/(м·К), что превосходит более чем в 80...300 раз теплопроводность стандартных печатных плат со встроенной металлизацией, при этом имеющих температуру полимеризации не более 300 °С, что в свою очередь позволяет формировать многослойную топологию сразу на алюминиевом основании модуля (см. рисунок, а). При изготовлении используется два типа паст – диэлектрическая и проводниковая. Характеристики слоев приведены в таблице.

Другим вариантом достижения цели стала конструкция силового модуля на основе плат сделанных по технологии анодированного алюминия и проводникового слоя из осажденной меди с покрытием – иммерсионное серебро. Такие платы обладают преимуществами, которые характерны для плат на основе DBC керамики, но при этом не имеют присущих им минусов. Единственным минусом конструкции – топология платы может быть только однослойной (см. рисунок, б).

В результате выполненных рабфот была отработана технология изготовления плат на основе низкотемпературных композиционных материалов, в том числе создано рабочее место по изготовлению плат, включающее в себя оборудование по изготовлению полимерных композиций, высокоинтеллектуальное оборудование по нанесению топологии платы, сушильный шкаф и оборудование для контроля качества изготовленной продукции.



а



б

Внешний вид силового модуля

**Характеристики диэлектрических слоев**

Наименование параметра	Значение
<b>Диэлектрический слой</b>	
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	14
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·м, не менее	$1 \cdot 10^{16}$
Теплопроводность, не менее, Вт/м·К	20
Коэффициент температурного линейного расширения, К	$(1-7) \cdot 10^{-6}$
<b>Проводниковый слой</b>	
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·м, не более	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Теплопроводность, Вт/м·К, не менее	50
Прочность сцепления (адгезия), кгс/см <sup>2</sup> , не менее	800

Кроме этого, отработана технология группового монтажа на платы, имеющие высокую теплопроводность (за счет сплошного алюминиевого основания).

Силовые модули прошли весь комплекс испытаний, включающий в себя электрические, механические, термические и термовакуумные испытания, соответствующие требованиям современных космических аппаратов, с положительными результатами. Проведенные работы подтверждают обработанность технологии изготовления силовых модулей на основе плат, имеющих теплопроводность в десятки раз выше, чем у стеклотекстолита.

**Библиографические ссылки**

1. Закс М. Теплоотводящие печатные платы для монтажа мощных светодиодов // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 6. С. 26–29.
2. Кондратюк Р. LTCC – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. 2011. № 2. С. 26–30.
3. Chemical, Structural, and Mechanical Properties of the LTCC Tapes / W. Kinzy Jones, L. Yanqing, L. Brooks и др. // The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging. 2000. Vol. 4. P. 469–473.
4. Шульц-Хардер Ю., Валев С. Медно-керамические подложки DBC: новые возможности, перспективы и проблемы создания нового поколения изделий силовой электроники // Компоненты и технологии. 2005. № 3.
5. DBC Technology for Low Cost Power Electronic Substrate Manufacturing / K. Hromadka, J. Stulik, J. Reboun et al. // 24th DAAAM International

Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2014. Vol. 69. P. 1180–1183.

**References**

1. Sachs M. Teplootvodyashchiye pechatnyye platy dlya montazha moschnykh svetodiodov [Heat sink printed circuit boards for mounting high-power LEDs] // Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti [Technology in the electronics industry]. 2011. № 6. P. 26–29.
2. Kondratuk R. LTCC – nizkotemperaturnaya sovmestno obzhigaemaya keramika [LTCC – low temperature co-fired ceramics] // Nanoindustriya [Nanoindustry]. 2011. № 2. P. 26–30.
3. Chemical, Structural, and Mechanical Properties of the LTCC Tapes / W. Kinzy Jones, L. Yanqing, L. Brooks et al. // The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging. 2000. Vol. 4. P. 469–473.
4. Schults-Harder U. Valev S. Medno-keramicheskiye podlozhki DBC: novyye vozmozhnosti, perspektivy i problemy sozdaniya novogo pokoleniya izdeliy silovoy elektroniki [DBC copper-ceramic substrates: new opportunities, prospects and problems of creating a new generation of power electronics products] // Komponenty i tehnologii [Components and technology]. 2005. № 3.
5. DBC Technology for Low Cost Power Electronic Substrate Manufacturing / K. Hromadka, J. Stulik, J. Reboun et al. // 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2014. Vol. 69. P. 1180–1183.

© Васильев И. С., Клишкин О. А., Сунцов С. Б., Фризоргер В. Г., 2019



УДК 621.313.392

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ НАЧАЛА ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ МОМЕНТА ТРОГАНИЯ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ

Д. С. Виноградов, А. В. Кортенко, А. А. Иванющенко, П. А. Алексанов

АО «Научно-производственный центр «Полус»  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в  
E-mail: info@polus-tomsk.ru

*Рассмотрены возможные конструкции бесконтактной системы начала вращения для стенда измерения момента трогания шарикоподшипников.*

*Ключевые слова: шарикоподшипник, электродвигатель, стенд.*

## SELECTION OF THE CONTACTLESS STARTING SYSTEM DESIGN FOR THE BALL BEARINGS START MOMENT MEASUREMENT SYSTEM

D. S. Vinogradov, A. V. Kortenko, A. A. Ivanyushchenko, P. A. Aleksanov

JSC “Scientific & Industrial Centre “Polyus”  
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: info@polus-tomsk.ru

*The paper presents possible construction of the contactless starting system for the ball bearings start moment measurement system.*

*Keywords: ball bearing, electric motor, system.*

Момент трогания является одним из ключевых параметров управляющего двигателя–маховика (УДМ), оказывающего значительное влияние на точность работы системы ориентации и стабилизации космического аппарата. Необходимость измерения этого параметра обусловлена режимом работы УДМ, который предполагает знакопеременное вращение маховика на околонулевых скоростях. Значение момента трогания УДМ в основном определяется моментом трогания пары шарикоподшипников, в которых смонтирован ротор УДМ.

Разработанная принципиальная схема стенда для измерения момента трогания радиально-упорных шарикоподшипников (см. рисунок) [1], помимо прочего включает в себя бесконтактную систему начала вращения (БСНВ), предназначенную для вращения внутреннего кольца шарикоподшипника относительно внешнего.

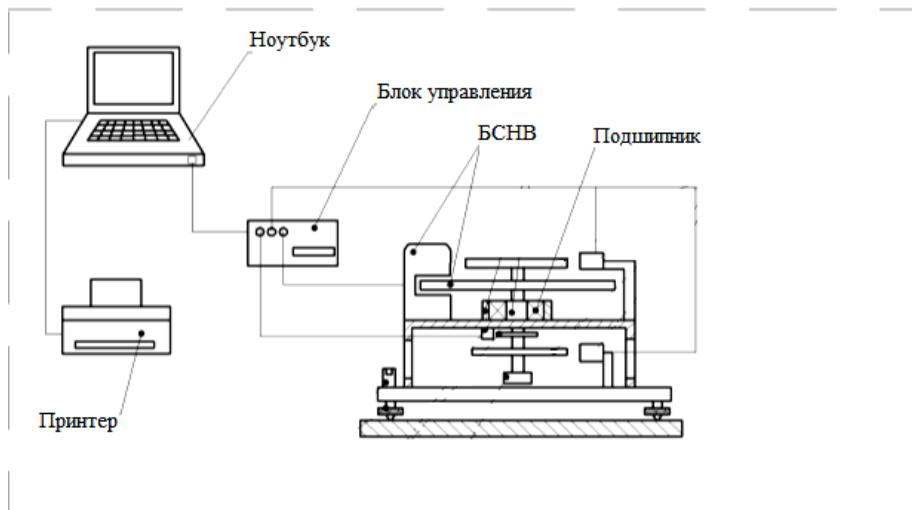
Для измерения момента трогания шарикоподшипника с высокой точностью БСНВ должна отвечать следующим требованиям: регулирование частоты вращения в диапазоне  $\pm 20$  об/мин для имитирования знакопеременного вращения маховика УДМ; малая инерционность вращающейся части; линейное регулирование пускового момента в широком диапазоне; симметричность прикладываемых к шарикоподшипнику сил. Также необходимо обеспечить достаточный воздушный зазор для многократной сборки и разборки стенда. С учетом этих требований проведен выбор типа электродвигателя.

В устройстве для измерения момента трогания шарикоподшипника применяется электродвигатель на

базе горизонтальной индукционной машины с дисковым ротором [1–4], имеющий токопроводящий диск и две катушки, смещенные друг относительно друга на 90 эл. град. Взаимодействие вихревых токов с магнитными потоками катушек в дисковом роторе создает момент, под действием которого диск приводится во вращение. Выбранное конструктивное решение способно обеспечить малую массу вращающихся частей, достаточный диапазон и дискретность регулирования пускового момента, технологичность сборки и разборки стенда.

К недостаткам этой схемы можно отнести несимметричное (одностороннее) приложение к диску электромагнитных сил, генерирующих момент. Установка нескольких симметрично расположенных катушек приведет к усложнению сборки и разборки. Для более точного измерения потребуется центровка диска и регулирование воздушных зазоров между диском и катушками. Необходимость центровки диска также усложняет монтаж испытываемых подшипников на стенд.

Еще одним вариантом исполнения БСНВ является двухфазный асинхронный двигатель с полым ротором [2–4]. Данная машина имеет две обмотки на статоре, оси которых сдвинуты в пространстве на 90 эл. град., и ротор из немагнитного токопроводящего материала. При питании обмотки статора двухфазным синусоидальным током возникает вращающееся магнитное поле, которое наводит вихревые токи в роторе. В результате взаимодействия вихревых токов с вращающимся магнитным полем возникает момент, который и приводит ротор во вращение.



Блок-схема стенда для измерения момента трогания шарикоподшипников

В зависимости от типа материала ротора можно обеспечить минимальную массу вращающихся частей и, соответственно, момент инерции. Также данная конструкция способна обеспечить симметричность прикладываемых сил и достаточный диапазон регулирования пускового момента. Недостатком асинхронного двигателя с полым ротором является отсутствие линейной зависимости между пусковым моментом и частотой, а также силой тока питающего напряжения.

Последним рассмотренным вариантом исполнения является БСНВ на базе бесконтактного двигателя постоянного тока [5; 6]. Он состоит из неподвижного немагнитного статора, вращающегося индуктора с магнитами и датчика положения ротора. В зависимости от сигнала с датчика положения ротора включаются определенные секции обмотки, создающие вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с магнитным потоком, создаваемым магнитами ротора, приводит его во вращение.

Система имеет линейную зависимость между пусковым моментом и током с равномерным распределением сил, прикладываемых к шарикоподшипнику, а также возможность регулирования пускового момента в широком диапазоне.

Анализ конструктивных схем и типов электродвигателей показал, что наиболее приемлемым вариантом, обеспечивающим выполнение требований, предъявляемых к БСНВ, является бесконтактный двигатель постоянного тока.

#### Библиографические ссылки

1. Пат. 172 555 Российская Федерация. Устройство для измерения момента трогания шарикоподшипника / Гладышев Ю. Г., Виноградов Д. С., Алексанов П. А. и др. № 2016147863 заявл. 06.12.16 ; опубл. 12.07.17, Бюл. № 20.

2. Вострокнутов Н. Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. М. : Госэнергоиздат, 1959.

3. Лопухина Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики : учеб. пособие для электротехн. вузов. М. : Высш. шк., 1988.

4. Лопухина Е. М., Сомихина Е. М. Асинхронные микромашины с полым ротором. Теория, основы расчета и испытания. М. : Энергия, 1967.

5. Попов В. И., Ахунов Т. А., Макаров Л. Н. Современные асинхронные электрические машины / Новая российская серия РА. М. : Знак, 1999.

6. Дубенский А. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока. М. : Энергия, 1967.

7. Гурин Я. С., Курочкин М. Н. Проектирование машин постоянного тока. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1971.

#### References

1. Pat. 172 555 Rossiyskaya Federatsiya. Ustriystvo dlya izmereniya momenta trovaniya sharikopodshipnika/ Gladishev Yu. G.; Vinogradov D. S.; Aleksanov P. A. i dr. № 2016147863 zayav. 06.12.16; opubl. 12.07.17, Byul. № 20.

2. Vostrokuntov N. G. Elektricheskie schetchiki i ih elsplyatatsiya. Moscow, Gosenergoizdat, 1959.

3. Lopuhina E. M. Asinhronnye ispolnitelnie mikrodivigateli dlya system avtomatiki. Moscow, Vishaya shkola, 1988.

4. Lopuhina E. M. Asinhronnye mikromashini s polym rotorom teoria. moskovskay tipografia. Moscow, Energiya, 1967. № 10.

5. Popov V. I. Ahunov T. A., Makarov L. N., Sovremennye asinhronnie elektricheskie mashini. Moscow, Znak, 1999.

6. Dubenskiy A. A. Beskontaktne divigateli postoyannogo toka. Moscow, Energiya, 1967.

7. Gurin Ya. S. Proektirovaniye mashin postoyannogo toka. Moscow, Gosenergoizdat, 1971.

© Виноградов Д. С., Кортенко А. В., Иванющенко А. А., Алексанов П. А., 2019

УДК 621.3.082

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ С ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

А. А. Дружинин, А. С. Асочаков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Sandru95@icloud.com

*Для подтверждения динамических характеристик импульсного преобразователя с цифровой системой управления для перспективных космических аппаратов применена методика снятия частотных характеристик, при которой используется периферия управляющего микроконтроллера.*

*Ключевые слова: частотная характеристика, измерение, источник питания, цифровая система управления, возмущение.*

## THE FREQUENCY RESPONSE MEASURING OF A POWER CONVERTER WITH A DIGITAL CONTROL SYSTEM

A. A. Druzhinin, A. S. Asochakov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Sandru95@icloud.com

*For verification a dynamic properties of a power converter with a digital control system for a promising satellite, we have applied the methodology of measure frequency response using a periphery of microcontroller.*

*Keywords: frequency response, measurement, power supply, control system, perturbation.*

Проектирование систем регулирования является задачей, которая требует точного математического описания динамических свойств, входящих в устройство функциональных элементов. Математическое описание выполняется в виде передаточных функций (ПФ) [1; 2]. Чем более точно будет выполнено математическое описание, тем лучше спроектированная система будет соответствовать характеристикам, полученным на этапе динамического расчета. Для верификации математического описания объекта управления и спроектированной системы регулирования, предлагается проводить экспериментальную работу по построению частотных характеристик (ЧХ) [3].

Измерение частотных характеристик основано на методике, разработанной в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) и адаптированной к разрабатываемому импульсному источнику питания с цифровым управлением.

В качестве объекта управления выступает импульсный источник питания, структурная схема которого вместе с цифровой системой управления приведена на рис. 1.

На структурной схеме:  $WIL.d(s)$  – ПФ преобразования изменения сигнала управления в изменение тока дросселя,  $WUo.IL(s)$  – ПФ преобразования изменения тока дросселя в изменение выходного напряжения,  $Kdt, Kdn$  – коэффициенту передачи датчиков тока и напряжения соответственно,  $Gi(s), Gu(s)$  – эквивалентные непрерывные ПФ регуляторов контуров

тока и напряжения, соответствующие дискретным ПФ, реализованным на цифровом устройстве управления.

В ходе экспериментов были получены ЧХ регулятора контура тока и разомкнутого контура тока. Устройством управления является цифровой микроконтроллер, поэтому внесение возмущения в систему, обработка данных и вывод измеряемых сигналов производится периферией микроконтроллера [4].

Устройством, с помощью которого выполняются измерения, является цифровой осциллограф Keysight DSO-X 3104T с функцией frequency response analyzer [5].

Функциональная схема экспериментов по снятию ЧХ регулятора контура тока и разомкнутого контура тока приведена на рис. 2. Измерение проводится следующим образом: генератор осциллографа генерирует знакопеременный синусоидальный сигнал, изменяющейся частоты, к этому сигналу прибавляется постоянная составляющая согласующим операционным усилителем. Смещенный сигнал оцифровывается АЦП микроконтроллера и выполняется его программный перерасчет с целью удаления постоянной составляющей и подстройки диапазона его изменения, в результате получается сигнал «h». АЦП МК оцифровывает сигнал с датчика тока и применяет к нему алгоритм регулирования, в ходе которого вычисляется сигнал рассогласования «e» и выходной сигнал регулятора «u».

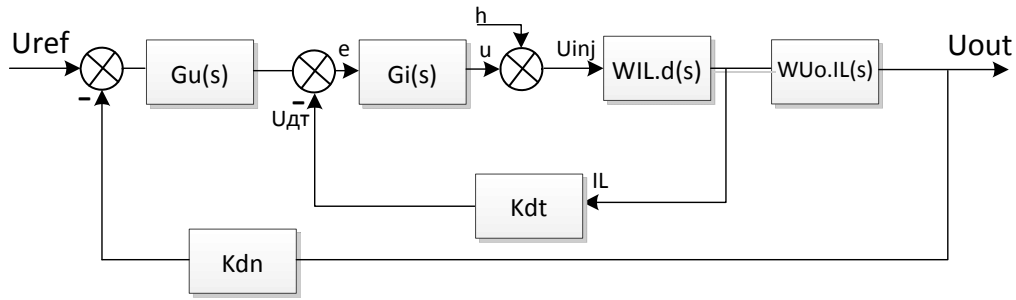


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной системы регулирования

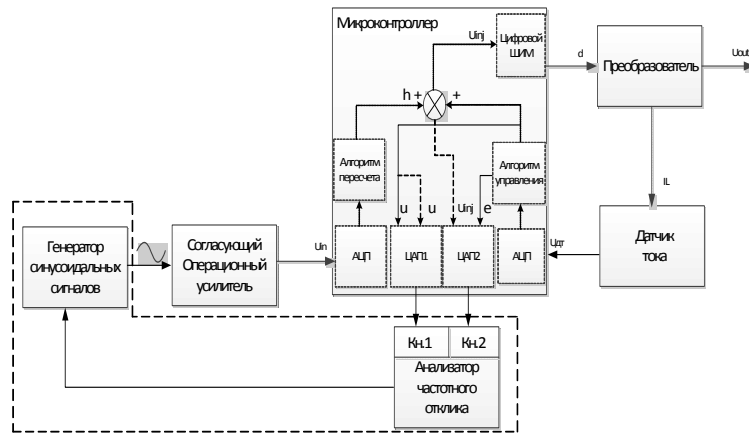


Рис. 2. Функциональная схема эксперимента по снятию частотных характеристик

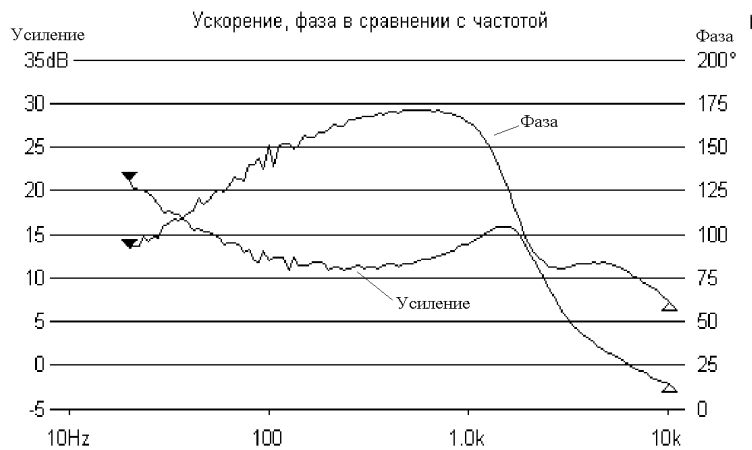


Рис. 3. ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутого контура тока

Происходит суммирование пересчитанного сигнала с регулятора «h» и сигнала с выхода регулятора «u» в результате чего получается сигнал «Uinj», который поступает на вход цифрового ШИМ, который формирует импульсы соответствующей ширины.

В эксперименте по измерению частотной характеристики регулятора на вход ЦАП1 поступает сигнал «u», а на ЦАП2 – «e» – сплошные линии, а при измерении частотной характеристики разомкнутого контура тока на ЦАП1 – «u», на ЦАП2 – «Uinj» – пунк-

тирные линии. В результате на каналах FRA появляются сигналы, необходимые для построения соответствующих диаграмм Бode.

По используемой методике были сняты ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутого контура тока импульсного источника питания с цифровой системой управления (рис. 3).

Таким образом, по данной методике могут быть измерены частотные характеристики разомкнутых контуров замкнутых цифровых систем управления, как контура тока, так и контура напряжения

в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1.

#### Библиографические ссылки

1. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М. : Наука, 1989. 304 с.
2. Белов Г. А. Динамика импульсных преобразователей. Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2001. 528 с.
3. John Rice. Accelerating Power-Supply Compliance to Specification. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/ml/slup308/slup308.pdf> (дата обращения: 10.08.2019)
4. Datasheet STM32F407VG [Электронный ресурс]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f407vg.pdf> (дата обращения: 10.08.2019).
5. DSOXT3FRA Frequency Response Analysis (FRA) for InfiniiVision 3000T X-Series Oscilloscopes. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.keysight.com/ru/pd-2794848-pn-DSOXT3FRA/frequency-response-analysis-fra-for-infiniivision-3000t-x-series-oscilloscopes?cc=RU&lc=rus> (дата обращения: 12.08.2019).

#### References

1. Popov E. P. *Teoriya linejnyh system avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory of linear systems of automatic regulation and control]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 304 p.
2. Beglov G. A. *Dinamika impul'snykh preobrazovatelej* [Dynamics of power converters]. Cheboksary, Chuvashiya Publ., 2001. 528 p.
3. John Rice. Accelerating Power-Supply Compliance to Specification [Electronic resource]. URL: <http://www.ti.com/lit/ml/slup308/slup308.pdf> (access: 10.08.2019).
4. Datasheet STM32F407VG [Electronic resource]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f407vg.pdf> (access: 10.08.2019).
5. DSOXT3FRA Frequency Response Analysis (FRA) for InfiniiVision 3000T X-Series Oscilloscopes [Electronic resource]. URL: <http://www.keysight.com/ru/pd-2794848-pn-DSOXT3FRA/frequency-response-analysis-fra-for-infiniivision-3000t-x-series-oscilloscopes?cc=RU&lc=rus> (access: 12.08.2019).

© Дружинин А. А., Асочаков А. С., 2019

УДК 621.3.082

**СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА БАЗЕ ПРОГРАММЫ LABVIEW**

А. А. Дружинин, А. С. Асочаков

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
 Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
 E-mail: Sandru95@icloud.com

*Для подтверждения заданных требований к разработанным системам регулирования бортовой аппаратуры, требуется проводить измерения частотных характеристик. Такие измерения проводятся специализированным прибором – анализатором частотного отклика. Однако предложена методика измерений на основе базового лабораторного оборудования и программы Labview.*

*Ключевые слова: частотная характеристика, измерение, лабораторное оборудование, система управления, Labview.*

**THE MEASUREMENT SYSTEM OF FREQUENCY RESPONSES BASED ON THE PROGRAM LABVIEW**

A. A. Druzhinin, A. S. Asochakov

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
 52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
 E-mail: Sandru95@icloud.com

*The measure of frequency responses is needed for verification a specification to designed control system of satellite’s hardware. These measurements special device is doing – Frequency response analyzer. However, we have proposed the methodology of measurement based on the conventional laboratory equipment and program Labview.*

*Keywords: frequency response, measurement, laboratory equipment, control system, Labview.*

Основным методом проектирования систем автоматического регулирования бортовой силовой аппаратуры является метод Логарифмических амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик. По этому методу система проектируется так, чтобы частота среза и запас по фазе разомкнутого контура управления соответствовали заданным требованиям [1].

Данный подход требует глубокого понимания работы устройства и детального математического описания динамики всех, входящих в состав устройства, узлов [2]. При составлении математических моделей часто не удается получить точное описание, и используются аппроксимированные модели. Одним из способов проверки того, что спроектированная система удовлетворяет заданным требованиям, является оценка параметров переходных процессов: длительность и

перерегулирование, однако такая оценка также является неточной. В связи с этим требуется прямое измерение частотных характеристик, как отдельных узлов прибора для оценки математических моделей, так и всего разомкнутого контура управления.

Для измерения ЛАЧХ и ФЧХ используются анализаторы частотного отклика, такие, как Ridley Engineering AP300, Omicron BODE100, а также решения на базе осциллографов Keysight DSO-X 31024T с функцией «Frequency response analysis» [3]. Однако часто такие приборы являются недоступными для использования по ряду факторов, поэтому была разработана система измерений на базе осциллографа, генератора и персонального компьютера (ПК) на котором предустановлено программное обеспечение Labview [4–5]. Функциональная схема системы измерений представлена на рис. 1.

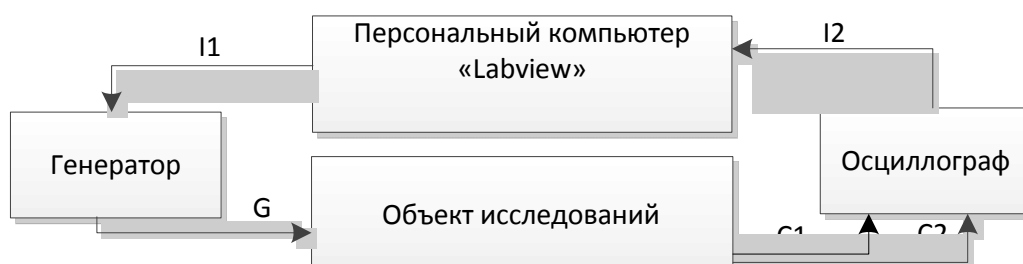


Рис. 1. Функциональная схема системы измерений

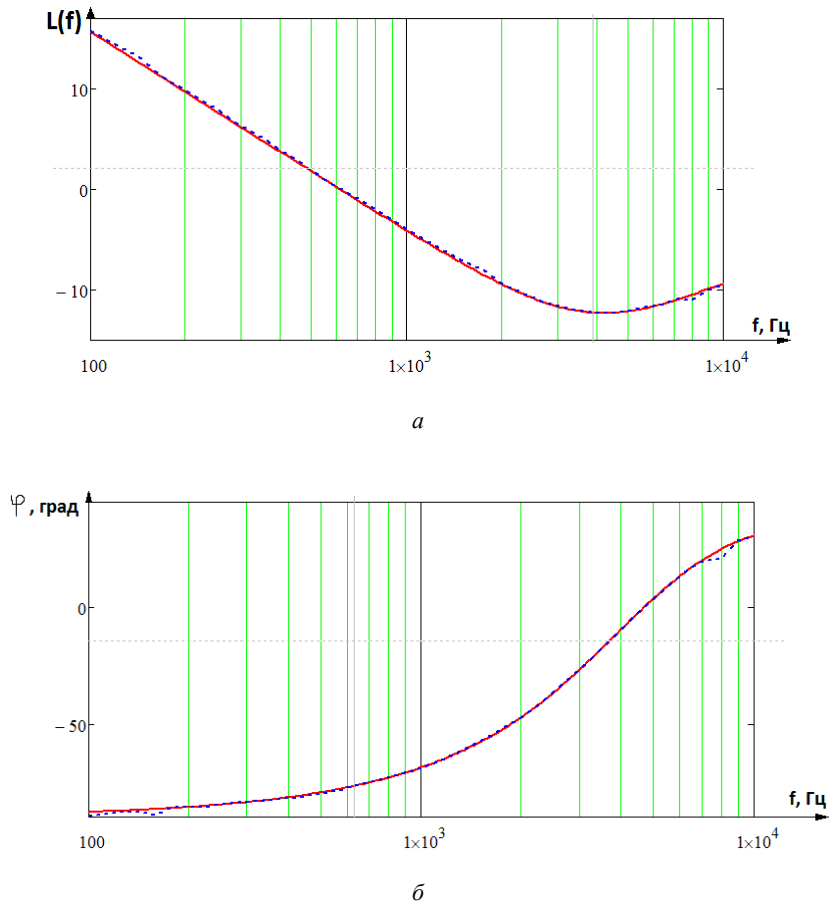


Рис. 2. Частотные характеристики цифрового ПИД-регулятора:  
а – ЛАЧХ; б – ФЧХ

С ПК по информационному каналу И1 передается команда на генерирование синусоидального сигнала (в автоматическом режиме) в заданном диапазоне частот с шагом, определяемым количеством измерений на декаду и с заданной амплитудой. Генерируемый синусоидальный сигнал на текущей частоте передается на объект исследований по каналу G и вносит возмущение в контур регулирования на заданной частоте. В результате внесения возмущения в контур регулирования на входной С2 и выходной С1 сигналы накладывается реакция на внесенное возмущение в контур регулирования. Измеренные сигналы С1 и С2 передаются по информационному каналу И2 на ПК в Labview, где данные сигналы раскладываются в дискретный ряд Фурье, и получается амплитудный и фазовый спектр сигналов С1 и С2. Тогда выражение (1) дает точку на ЛАЧХ на текущей частоте, а выражение (2) дает точку на ФЧХ на текущей частоте. После этого генератор по каналу G передает синусоидальный сигнал следующей частоте. Таким образом, строятся характеристики во всем заданном диапазоне частот.

$$L(f) = 20 \div \log \left( \frac{A1(f)}{A2(f)} \right), \quad (1)$$

где  $A1$  – значение амплитудного спектра на текущей частоте канала С1;  $A2$  – значение амплитудного спектра на текущей частоте канала С2.

$$\phi(f) = \phi1(f) - \phi2(f), \quad (2)$$

где  $\phi1$  – значение фазового спектра на текущей частоте канала С1;  $\phi2$  – значение фазового спектра на текущей частоте канала С2.

Для проверки системы измерений экспериментально были получены частотные характеристики цифрового ПИД-регулятора, которые изображены на рис. 2 пунктирной линией, а сплошной линией показаны расчетные характеристики.

Как видно из рис. 2, теоретические и экспериментальные графики имеют незначительные различия, что подтверждает эффективность разработанной системы измерений.

#### Библиографические ссылки

1. Lucca Corradini, Dragan Maccsimovich. Digital Control of high frequency Switched-Mode Power Converters. Hoboken, New Jersey, 2015. 356 p.
2. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М. : Наука, 1989. 304 с.
3. DSOXT3FRA Frequency Response Analysis (FRA) for InfiniiVision 3000T X-Series Oscilloscopes [Электронный ресурс]. URL: <http://www.keysight.com/ru/pd-2794848-pn-DSOXT3FRA/frequency-response-analysis-fra-for-infiniivision-3000t-x-series-oscilloscopes?cc=RU&lc=rus> (дата обращения: 12.08.2019).

4. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW : учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. М. : ДМК Пресс, 2007. 456 с.

5. Кудрин А. В. Использование программной среды Labview для автоматизации проведения физических экспериментов : электронное учеб.-метод. пособие. Н. Новгород : Нижегородский гос. ун-т, 2014. 68 с.

#### References

1. Lucca Corradini., Dragan Macsimovich. Digital Control of high frequency Switched-Mode Power Converters. Hoboken, New Jersey, 2015. 356 p.

2. Попов Е. Р. *Teoriya linejnyh system avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory

of linear systems of automatic regulation and control]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 304 p.

3. DSOXT3FRA Frequency Response Analysis (FRA) for InfiniiVision 3000T X-Series Oscilloscopes [Electronic resource]. URL: <http://www.keysight.com/ru/pd-2794848-pn-DSOXT3FRA/frequency-response-analysis-fra-for-infiniivision-3000t-x-series-oscilloscopes?cc=RU&lc=rus> (accessed: 12.08.2019).

4. Fedosov V. P., Nesterenko A. K. Digital signal processing in Labview. Moscow, DМК Press, 2007. 456 p.

5. Kudrin A. V. Using Labview software to automate physical experiments. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod university, 2014. 68 p.

© Дружинин А. А., Асочаков А. С., 2019



## УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ LTCC-КЕРАМИКИ

А. Б. Калюжная

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
 Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
 E-mail: Anastasya.kaliuzhnaya@mail.ru

*Исследуется низкотемпературная керамика (LTCC), так как эта технология используется на протяжении ряда лет в различных отраслях промышленности. В результате ее широкого использования открываются новые возможности для производства электронных изделий в таких направлениях, как военная и космическая техника.*

*Ключевые слова: LTCC-керамика, СВЧ-устройства, интегральные схемы, прямо-передающие антенны.*

## DEVICES BASED ON LTCC CERAMICS

А. В. Kalyuzhnaya

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
 52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
 E-mail: Anastasya.kaliuzhnaya@mail.ru

*The article is devoted to the study of low-temperature ceramics (LTCC) it, as this technology has been used for a number of years in various industries. As a result of its widespread use, new opportunities for the production of electronic products in such areas as, military and space technology are opening up.*

*Keywords: LTCC ceramics, microwave devices, integrated circuits, transceiver antennas.*

LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) – это совокупность диэлектрического материала и высокопроводящей металлизационной пасты, которые образуют трехмерную интегральную систему и спекаются одновременно за один технологический цикл. Данный материал используется в электронной промышленности для изготовления корпусов, многослойных структур и СВЧ-устройств, применяемых в том числе в космической отрасли [1].

Технология имеет следующие преимущества и особенности.

1. Низкая температура спекания (750...1000 °С), что существенно упрощает производственный процесс [1; 2].

2. Механическая устойчивость и сохранение стабильных линейных размеров обеспечиваются малым коэффициентом теплового расширения.

3. Низкие диэлектрические потери, стабильные в широком диапазоне частот.

Для разных типов систем диэлектрическая проницаемость LTCC-керамики варьируется от 6 до 9, а тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,001 до 0,006 в СВЧ-диапазоне.

4. Возможность создания трехмерных структур до 80 и более рабочих слоев.

Благодаря перечисленным достоинствам LTCC-технология успешно применяется производителями многослойных плат для ВЧ- и СВЧ-корпусов микросхем и электронных приборов. LTCC-материалы имеют неоспоримый потенциал развития и совершенствования для того, чтобы составить серьезную конкуренцию многослойным платам из стеклотекстолита и высокотемпературной керамики [3].

На рис. 1 приведена конфигурация и характеристики полосно-пропускающего фильтра 3-го порядка [4].

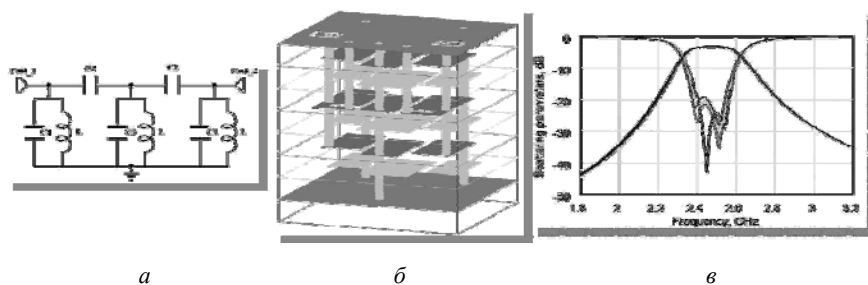


Рис. 1. Эквивалентная схема ППФ (а); LTCC-структура фильтра (б); экспериментальные характеристики 4-х образцов ППФ (в)

Использовалось 8 слоев керамики Dupont Green Tape™ 951 толщиной  $d = 92$  мкм, ( $\epsilon_r = 7,8$ ), размер фильтра  $4,65 \times 4,3 \times 0,74$  мм<sup>3</sup>. Для уменьшения размеров применялась стековая структура конденсаторов и индуктивностей (рис. 1, б). На рис. 1, в приведены экспериментальные характеристики коэффициентов передачи и отражения для 4-х образцов фильтра.

На рис. 2 представлена антенна, состоящая из 256 печатных излучателей (16D16) [5]. Площадь антенны, работающей на частоте 29 ГГц, составляет  $12,7D12,7$  см<sup>2</sup>. Антенна возбуждается при помощи стандартного прямоугольного волновода (WR28). Система излучателей и распределения мощности выполнена в 12 слоях LTCC-керамике.

Технология многослойных ИС на основе LTCC-керамики позволяет объединять различные СВЧ-устройства в составе одной многослойной структуры, во внутренних слоях которой реализуются все пассивные элементы, а на поверхности размещаются дискретные активные компоненты и монолитные ИС.

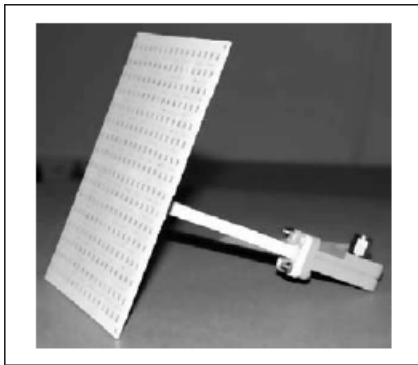


Рис. 2. Антенная решетка, содержащая 256 (16×16) излучателей, выполненная с использованием LTCC-керамики

Основным преимуществом СВЧ-модулей, выполненных на LTCC-керамике, является существенное уменьшение габаритов устройств по сравнению с традиционной реализацией на дискретных компонентах.

Таким образом, статья показывает, что технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) обладает высокой степенью универсальности. Данная технология позволяет реализовывать изделия из керамики практически любой сложности. Данная технология при массовом производстве является более экономически привлекательной, чем многие существующие аналогичные технологии.

Дальнейшее совершенствование технологической базы LTCC и увеличение степени интеграции реализуемых устройств может оказать существенное влияние на развитие систем связи и заметно изменить расстановку сил на рынке телекоммуникационных услуг уже в ближайшие годы.

#### Библиографические ссылки

1. Кондратюк Р. LTCC – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. 2011. № 2. С. 26–30.
2. Gongora-Rubio M. R., Espioza-Vallejos P., Sola-Laguna L. Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST) // Sensors and Actuators. 2001. Vol. 89. P. 222–241. Doi: 10.1016/S0924-4247(00)00554-9.
3. Mistler R. E., Twiname E. R. Tape casting: theory and practice. Westerville, OH: American ceramic society, 2000. 298 p.
4. Design and Investigation of Miniaturized High-Performance LTCC Filters for Wireless Communications / V. Piatnitsa, D. Kholodnyak et al // Proc. of EuMC37, Munich Germany. P. 544–547. October 2007.
5. Huang Y., Wu K.-L., Fang D.-G., Ehlert M. An integrated LTCC millimeter-wave planar array antenna with low-loss feeding network // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. № 3.

#### References

1. Kondratyuk R. LTCC-low-temperature co-fired ceramics // Nanoindustry. 2011. № 2. P. 26–30.
2. Gongora-Rubio M. R., Espioza-Vallejos P., Sola-Laguna L. Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST) // Sensors and Actuators. 2001. Vol. 89. P. 222–241. Doi: 10.1016/S0924-4247(00)00554-9.
3. Mistler R. E., Twiname E. R. Tape casting: theory and practice. Westerville, OH: American ceramic society, 2000. 298 p.
4. Design and Investigation of Miniaturized High-Performance LTCC Filters for Wireless Communications / V. Piatnitsa, D. Kholodnyak et al // Proc. of EuMC37, Munich Germany. P. 544–547. October 2007.
5. Huang Y., Wu K.-L., Fang D.-G., Ehlert M. An integrated LTCC millimeter-wave planar array antenna with low-loss feeding network // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. № 3.

© Калужная А. Б., 2019

УДК 629.7.05.03

## ПРОБЛЕМА СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СОСТАВЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. С. Лепёшкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: klepka1111.93@mail.ru

*Рассматривается проблема в области сбоеустойчивости криптографических систем космических аппаратов. Рассмотрены работы зарубежных авторов, основные результаты их исследований. Это доказывает актуальность и серьезность изучения влияния одиночных сбоев на реализации криптографических алгоритмов. Необходимо создание новых методик проведения испытаний бортовых криптосистем на устойчивость к сбоям ИИ, результаты которых будут применимы для создания надежных криптосистем отечественных КА.*

*Ключевые слова: сбоеустойчивость, криптографические системы, космический аппарат, ионизирующее излучение.*

## THE FAULT TOLERANCE PROBLEM OF CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS IN THE COMPOSITION OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT

E. S. Lepeshkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: klepka1111.93@mail.ru

*The article deals with the fault tolerance problem of cryptographic systems of spacecraft. The works of foreign authors and the main results of their researches are considered. This proves the relevance and seriousness of studying the effect of single failures on the implementation of cryptographic algorithms. It is necessary to create new methods for testing onboard cryptosystems for resistance to ionizing radiation faults, the results of which will be applicable to create reliable cryptosystems of domestic spacecraft.*

*Keywords: fault tolerance, cryptographic systems, spacecraft, ionizing radiation.*

В настоящее время в качестве одной из причин сбоев элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в земных условиях рассматривается ионизирующее излучение космического пространства. Для аппаратуры бортовых систем космических аппаратов эта причина сбоев является основной. Сбоеустойчивость является важнейшим требованием к аппаратуре, работающей в тяжелых условиях космоса. Особенно важным это требование является для программных и аппаратных реализаций криптографических алгоритмов, обеспечивающих безопасность больших объемов данных, передаваемых от КА на Землю и представляющих для собственников коммерческих интерес.

Ряд зарубежных авторов посвятили свои работы данному вопросу. Среди них: Баренги А., Арлат Дж., Гайслер Дж., Уивер Кр. и др. Некоторые авторы (Кчаоу А., Йоуссеф В. Ел Хадж, Мансоур В., Веласко Р.) в своих работах представили анализ влияния одиночных эффектов на внутреннюю память процессора, чаще всего использующегося в бортовой аппаратуре, с помощью эмуляции одиночных сбоев, осуществляемого новыми программными методами. Баренги А. в своей работе «Fault injection attacks on cryptographic

devices: Theory, practice, and countermeasures» [1] описывает атаки с помощью введения сбоев, малозатратные как по оборудованию, так и по времени. В документе дается подробное описание этих атак на криптографические устройства, эксплуатирующихся в наземных условиях, и разработанных ответных контрмер. Арлат Дж. в работе «Fault Injection for Dependability Validation: A Methodology and Some Applications» [2] рассматривает проблему проверки надежности отказоустойчивых вычислительных систем и предлагает подход, основанный на введении сбоев на физическом уровне в программно-аппаратный прототип системы. Что касается систем аутентификации, реализованных посредством разных стандартов шифрования, они подвергались влиянию внесенных различными методами сбоев в работах Баренги А. (Fault injection attacks on cryptographic devices: theory, practice, and countermeasures) [1], Дехбаоуи А. (Electromagnetic Transient Faults Injection on a Hardware and a Software Implementations of AES) [3] и Ордас С. (EM Injection: Fault Model and Locality) [4]. Было выявлено, что сбои могут привести как к «ошибочному» шифрованию, так и к остановке работы целой схемы.

Наличие современных исследований данной проблемы доказывает актуальность и серьезность изучения влияния ИИ, а точнее одиночных сбоев вызванных им, на аппаратную и программную реализации криптографических алгоритмов.

Необходимо создание новых методик проведения испытаний бортовых криптосистем на устойчивость к сбоям ИИ, результаты которых будут применимы для создания надежных криптосистем отечественных КА.

#### References

1. Barenghi A., Breveglieri L., Koren I., Naccache D. *Fault Injection Attacks on Cryptographic Devices: Theory, Practice, and Countermeasures*. Proceedings of the IEEE. 2012. Vol. 100, Iss. 11. P. 3056–3076.
2. Arlat J., Aguera M., Amat L. *Fault Injection for Dependability Validation: A Methodology and Some Applications*. IEEE Transactions on Software Engineering. 1990. P. 166–182.
3. Dehbaoui A., Dutertre J. Max, Robisson B., Tria A. *Electromagnetic Transient Faults Injection on a Hardware and a Software Implementations of AES*. 2012 Proc. IEEE FDTC. P. 7–15.
4. Ordas S., Guillaume-Sage L., Maurine Ph. *EM Injection: Fault Model and Locality*. Proc. IEEE FDTC 2015.

© Лепёшкина Е. С., 2019

УДК 621.311.6

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

А. А. Миронов

ООО «Александр Электрик источники электропитания»  
Российская Федерация, 129343, г. Москва, проезд Серебрякова, д. 6, стр. 3  
E-mail: mironov@aeip.ru

*Описываются особенности эксплуатации и параметры модулей питания, стойких к ТЗЧ и большим дозовым нагрузкам, предназначенных для построения систем электропитания космических аппаратов.*

*Ключевые слова: модуль электропитания, тяжелые заряженные частицы, интегральная дозовая нагрузка, минимальная наработка.*

## EXPERIENCE IN DEVELOPMENT OF POWER SUPPLIES FOR RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACE DEVICES

A. A. Mironov

LLC "Aleksander Elektrik Istochniki Elektropitaniya"  
Russian Federation, 129343, Moscow, proezd Serebryakova, 6, build. 3  
E-mail: mironov@aeip.ru

*The operation features and parameters of power modules, resistant to heavy charged particles and high dose loads, designed to build power systems for spacecraft, are described.*

*Keywords: power supply module, heavy charged particles, integral dose load, minimum operating time.*

Одно из основных требований к средствам электропитания радиоэлектронных приборов космического аппарата – способность устойчиво работать при воздействии тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) заданного уровня энергии и значительных дозовых нагрузках.

Способность модулей электропитания (МП) соответствовать требованиям ТУ в условиях действия указанных внешних воздействующих факторов определяется их схмотехникой, применённой элементной базой (ЭКБ), материалами и конструкцией. Учёт при разработке этих составляющих позволяет создать МП с необходимой стойкостью.

Анализ ЭКБ, материалов и техпроцессов при изготовлении МП, осциллограмм напряжений и токов в наиболее важных узлах схемы позволил при небольшой доработке серийных унифицированных модулей создать линейку МП, пригодную для работы в аппа-

ратуре группы 5.3 по ГОСТ РВ 20.39.304 и удовлетворяющих следующим требованиям:

- минимальная наработка на отказ 140 000 ч в облегченном режиме при  $U_{\text{пит}} = 100 \text{ В}$ ,  $P_{\text{вых}} = (0,05 \dots 0,5) \times P_{\text{ном}}$ ,  $T_{\text{кор}} = +60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - гамма-процентный срок сохраняемости 21 год при  $\gamma = 97,5 \%$ ;
  - допустимый уровень ТЗЧ 60 МэВ $\times$ см<sup>2</sup>/мг при входном напряжении 82...123 В;
  - интегральная накопленная доза, полученная на испытаниях, при которой параметры МП находились в пределах норм ТУ, 284 крад.
- Основные технические характеристики МП приведены в таблице.

Остальные характеристики и ВВФ – в соответствии с БКЮС.436437.004ТУ. Внешний вид модулей питания показан на рисунке.



Внешний вид модулей питания

**Основные технические характеристики МП**

Тип модуля питания	Номинальная выходная мощность, Вт	Максимальный выходной ток, А	Диапазон входного напряжения, В	Количество выходных каналов	Габаритные размеры, (с фланцами), мм	Масса не более (с фланцами), г
МДМ30-1(2)НП	30	5	сеть «Н» (82...154)	1, 2	58×40×10 (68×40×10)	65 (70)
МДМ60-1НП	60	10		1	73×53×13 (85×53×13)	120 (130)
МДМ120-1НП	120	20		1	95×68×13 (107×68×13)	200 (210)
МДМ160-1НП	160	25		1	95×68×13 (107×68×13)	200 (210)

© Миронов А. А., 2019

УДК 629.78.054:621.396.018

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ВНЕСЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Д. А. Недорезов, С. С. Красненко

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

*Представлены разработки, которые усовершенствуют ранее известные методы контроля и испытаний бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов, основанные на аппаратно-программном внесении неисправностей.*

*Ключевые слова: отработка, контроль, испытания, электронная аппаратура, ПЛИС, испытательный комплекс, внесение неисправностей, мутации.*

## DEVELOPMENT OF TEST METHODS ONBOARD ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACERAFTS BASED ON FAULT INJECTION

D. A. Nedorezov, S. S. Krasnenko

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: nd@iss-reshetnev.ru

*Developments that improve previously known methods for monitoring and testing on-board electronic equipment of spacecraft based on hardware-software fault injection are presented.*

*Keywords: elaboration, monitoring, testing, electronic equipment, FPGA, test complex, fault injection, mutations.*

Процесс поддержания и улучшения надежности бортовой электронной аппаратуры (БЭА) космических аппаратов (КА) требует совершенствования существующих методов и средств ее контроля и испытаний. Одним из ярких представителей подобных методов, является, все чаще применяемый, «Метод внесения неисправностей». Данный метод находит применение для оценки способности испытываемой аппаратуры определять и парировать нештатные ситуации. В данной работе представлено несколько авторских разработок, которые позволяют улучшить надежность БЭА КА.

1. Для метода мутационных испытаний БЭА КА, который был ранее предложен автором в работе [1] и запатентован в [2], предложены новые алгоритмы и правила внесения аппаратно-программных неисправностей, позволяющие повысить надежность и полноту контроля БЭА КА при одновременном сокращении сроков испытаний. Из ранее изданных работ автора [1–3] было известно, что, при помощи специальной контрольно-испытательной аппаратуры (КИА), на Земле, воссоздают электронные системы, подобные бортовым и включают в их состав объекты контроля (ОК), которыми являются натуральные бортовые приборы. В состав КИА включают различные устройства аналогового и цифрового ввода-вывода, релейной коммутации, бортовых интерфейсов и пр., которые полунатурно имитируют БЭА, которая, в процессе штатной эксплуатации взаимодействует с ОК. Управляет испытаниями ЭВМ. Адекватность полунатурной

имитации бортовых систем обеспечивается наличием в КИА программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), так как ПЛИС позволяют проводить полунатурную имитацию в режиме реального времени для бортовой аппаратуры, которая является высокочастотной и высокодетерминированной по временным характеристикам. Кроме того, предложенный метод, в отличие от аналогов, позволяет адекватно имитировать неисправности электронной компонентной базы приборов (резисторов, конденсаторов, оптронов и пр.) в части поведения внешних каналов ввода-вывода имитируемых устройств, которые заменяются внешними каналами специальных модулей с ПЛИС из состава КИА. Исходными данными для полунатурного моделирования, в данном случае, являются исторические сведения об имитируемых нештатных ситуациях, которые возникали на борту КА или при наземной отработке. Усовершенствование метода состоит в предложенных правилах локализации вносимых неисправностей, которые гласят, что необходимо имитировать неисправность: каждого элемента компонентной базы моделируемой аппаратуры (МА) и каждого элемента управляющего ПО; в каждой из возможных ветвей алгоритма работы МА; каждой функции, которую выполняет МА в части взаимодействия с ОК; всех интерфейсов передачи данных, представленных в МА; всех типов и диапазонов данных представленных в МА [4]. Также предложено представлять каждую вносимую неисправность в виде вершины ориентированного графа, что позво-

ляет применить специальный математический аппарат и реализовать алгоритмы автоматического полного перебора всех возможных комбинаций неисправностей, появляющихся в ходе воспроизводимой нештатной ситуации.

2. Для обнаружения редких событий, в ходе контроля электрических параметров ОК, при испытаниях, проводят длительное (до года) осциллографирование. В результате получают большие объемы записанных данных, необходимый анализ которых, в ручном режиме невозможен. Поэтому актуальны разработки систем автоматизированного анализа осциллограмм на предмет наличия в них аномалий или так называемых «артефактов» сигнала. Для испытаний систем автоматизированного анализа осциллограмм длительного функционирования [5] разработана программа электронной вычислительной машины (ЭВМ) «Генератор артефактов». Данная программа, путем внесения неисправностей, позволяет автоматически генерировать основные типы аномалий периодических сигналов (синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы). Актуальность этой программы ЭВМ диктуется острым дефицитом подобных генераторов, которые необходимы для определения эффективности систем автоматизированного анализа осциллограмм.

3. На сегодняшний день, для повышения и подтверждения надежности БЭА, требуется проводить испытания, в процессе которых, полностью реализуются ГОСТ Р 52074–2003 и ГОСТ Р 52075–2003. Данные ГОСТ регламентируют стратегию испытаний устройств мультиплексного канала обмена (МКО) и особое место в них отведено внесению неисправностей Манчестерского кода и граничных амплитуд восприятия. Но на отечественном рынке, отсутствовало программное обеспечение (ПО), полностью реализующее данные ГОСТ. В АО «ИСС» такое ПО разработано и апробировано при испытаниях БЭА бортового комплекса управления. Более того, разработан универсальный формирователь неисправностей Манчестерского кода, который позволяет формировать любые неисправности на максимально низком уровне в режиме реального времени, путем синтеза на ПЛИС, что позволяет выполнять требования к испытаниям не описанные в ГОСТ, которые, возможно, со временем, станут актуальными.

Вышеописанные технологии и средства позволяют улучшить характеристики БЭА при одновременном сокращении временных ресурсов, что приносит положительный экономический эффект, их следует внедрять в производственный процесс на других предприятиях отечественной промышленности.

#### Библиографические ссылки

1. Методология мутационного тестирования для наземных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов / Д. А. Недорезов, О. В. Непомнящий,

А. И. Легалов и др. // Системы и средства информатики. 2014. № 1 (24). С. 75–78.

2. Пат. 2549523 Российская Федерация, МПК G06N 3/063. Способ мутационного тестирования радиоэлектронной аппаратуры и ее управляющего программного обеспечения / Недорезов Д. А. № 2014117399 ; заявл. 29.04.2014 г. ; опубл. 30.03.2015 г.

3. Применение ПЛИС для моделирования логики функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / Д. А. Недорезов, О. В. Непомнящий, А. В. Пичкалев и др. // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 133–136.

4. Пат. 2661535 Российская Федерация, МПК G06N 3/063. Способ мутационного тестирования электронной аппаратуры и ее управляющего программного обеспечения с определением локализации мутаций / Недорезов Д. А. № 2017120894 ; заявл. 14.06.2017 г. ; опубл. 17.07.2018 г.

5. Пат. 2684203 Российская Федерация, МПК G06K11/00. Способ интеллектуального анализа осциллограмм / Недорезов Д. А. № 2017140553 ; заявл. 21.11.2017 г. ; опубл. 04.04.2019 г.

#### References

1. Nedorezov D. A., Nepomnyashchiy O. V., Legalov A. I., Ankudinov A. V., Krasnenko S. S. Mutation testing methodology for ground testing of spacecraft onboard equipment [Metodologija mutacionnogo testirovanija dlja nazemnyh ispytanij bortovoj apparatury kosmicheskikh apparatov]. *Sistemy i sredstva informatiki (Systems and means of informatics)*. Moscow, 2014. P. 75–78.

2. Nedorezov D. A. Sposob mutacionnogo testirovanija radioelektronnoj apparatury i ee upravljajushhego programmnogo obespechenija [Method for mutation testing of electronic equipment and its control software]. Patent RF, no. 2549523, 2015.

3. Nedorezov D. A., Nepomnyashchiy O. V., Pichkalev A. V., Krasnenko S. S. The use of FPGA for modeling the logic of functioning of on-board electronic equipment of spacecraft [Primenenie PLIS dlja modelirovanija logiki funkcionirovanija bortovoj radioelektronnoj apparatury kosmicheskikh apparatov] (*SSU Herald*). Krasnoyarsk, 2014. P. 133–136.

4. Nedorezov D. A. Sposob mutacionnogo testirovanija radioelektronnoj apparatury i ee upravljajushhego programmnogo obespechenija s opredeleniem lokalizacii mutacij [Method for mutation testing of electronic equipment and its control software with mutation localization]. Patent RF, № 2661535. 2018.

5. Nedorezov D. A. Sposob intellektual'nogo analiza oscillogramm [Intellectual method for waveform mining]. Patent RF, № 2017140553. 2019.

© Недорезов Д. А., Красненко С. С., 2019



УДК 519.688

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК В МЕСТАХ УСТАНОВКИ ЭРИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Г. Н. Шерстенникова\*, А. С. Шаура

ООО «ИРЗ», г. Ижевск  
Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Базисная, 19  
\*E-mail: vakilova@irz.ru

*Стойкость бортовой РЭА к воздействию ионизирующих излучений космического пространства определяет срок ее активного существования. Предложен способ определения дозовых нагрузок в местах установки ЭРИ на ранних этапах проектирования для учета их при компоновке блока.*

*Ключевые слова: накопленная доза, реальное экранирование, компоновка блоков, лучевой анализ, радиационная стойкость.*

## CALCULATION RADIATION ABSORBED DOSE AT COMPONENT LOCATIONS TAKING IN TO ACCOUNT REAL SPACECRAFT AND EQUIPMENT SHIELDING

G. N. Sherstennikova\*, A. S. Shaura

JSC "IRZ", Izhevsk  
19, Bazisnaya Str., Izhevsk, 426000, Russian Federation  
\*E-mail: vakilova@irz.ru

*The radiation hardness of electronic equipment determine its lifetime in the space environment. In this paper we present the method of calculation the distribution of radiation absorbed dose at component locations to use these values for electronic parts layout.*

*Keywords: total ionization dose, real shielding, equipment layout, ray tracing analysis, radiation hardness.*

Суммарная накопленная доза ионизирующего излучения является одним из основных дестабилизирующих факторов космического пространства и вследствие своего кумулятивного характера непосредственно влияет на срок активного существования космических аппаратов. Единственным способом защиты от накопленной дозы является экранирование, поэтому в случае недостаточного ослабления потоков заряженных частиц элементами конструкций космического аппарата (КА), блоков и т. д. применяют дополнительные защитные экраны, увеличивая тем самым массу конечного изделия.

Согласно отечественному ОСТ 134-1034-2012 [1] и европейскому ECSS-E-ST-10-12C [2] расчетная оценка радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры должна проводиться в один или несколько этапов.

На первом этапе проводится оценка накопленных доз по «наихудшему случаю» при минимальной массовой толщине защиты, складывающейся из толщины оболочки КА, кожуха РЭА и корпуса блока.

На втором этапе проводится расчет по методикам «лучевого анализа» с использованием геометрической модели КА и средней плотности блоков, без учета конструкции и заполнения самих блоков. И только на третьем этапе осуществляется расчет доз для каждого ЭРИ в местах их непосредственного размещения внутри блока с использованием геометрических мо-

делей КА и блока с учетом его внутренних элементов: печатных плат, перегородок, ЭРИ и т. п. Основная цель такой последовательности этапов – снижение трудоемкости и затрат на проведение анализа радиационной стойкости ввиду отсутствия доступных программных средств, позволяющих проводить быстрый расчет для каждого элемента в соответствии с третьим этапом, хотя [1] допускает начинать проведение анализа сразу с последнего этапа, исключая все предыдущие.

Для проведения анализа радиационной стойкости к дозовым эффектам используется разработанный в АО «Ижевский радиозавод» программный комплекс [3], подробное описание которого приведено в [4]. Данный комплекс позволяет проводить поэтапный анализ в местах непосредственной установки ЭРИ с одновременным учетом геометрических моделей КА и блоков бортовой РЭА с реальными внутренними компоновками, наполнением и всеми элементами конструкции (рис. 1).

Если по результатам анализа коэффициент запаса оказывается меньше единицы, данный блок РЭА признается не радиационностойким и подлежит доработке. Требуемая защита не прошедших по коэффициенту запаса ЭРИ может быть обеспечена не только путем введения внешних локальных экранов, но и за счет новой компоновки блока. Чтобы иметь возможность расположить наименее стойкие ЭРИ в местах,

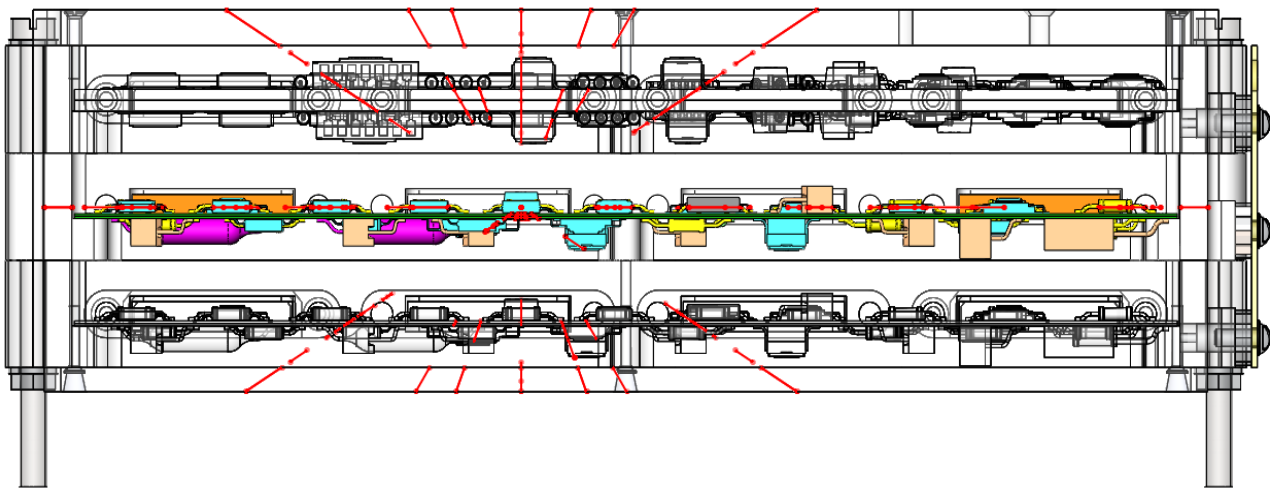
наиболее защищенных элементами конструкции блока и КА, необходимо знать распределение дозовых нагрузок внутри блока уже на начальных этапах проектирования. В случае, когда аппаратура имеет во многом типовую конструкцию, ее примерные массогабаритные характеристики и геометрическая модель не принципиально зависят от выбора ЭРИ, а планируемые к применению ЭРИ имеют существенно разную чувствительность и стойкость к дозовым эффектам, польза такого подхода к компоновке и обеспечению радиационной стойкости РЭА наиболее очевидна. Данная задача также может быть решена с помощью представленного программного комплекса. Пример такого анализа для одной из рамок в составе блока показан на рис. 2.

На рис. 2, а явно видно влияние стенок и перегородок блока, а также его размещения в структуре КА, на распределение дозовых нагрузок внутри него.

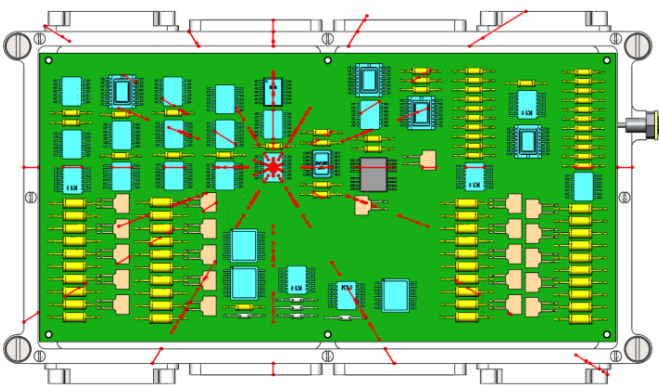
Опыт проведения поэлементных анализов радиационной стойкости РЭА в составе КА показывает, что в зависимости от места установки ЭРИ в пределах одного изделия дозовая нагрузка может изменяться в 10 и даже более раз [4].

Разработанное ПО позволяет проводить вычисления на реальных 3D-моделях, содержащих тысячи элементов, выбирать количество секторов (трассирующих лучей) от нескольких сотен до десятков тысяч, требуя при этом не более нескольких минут на каждую расчетную точку.

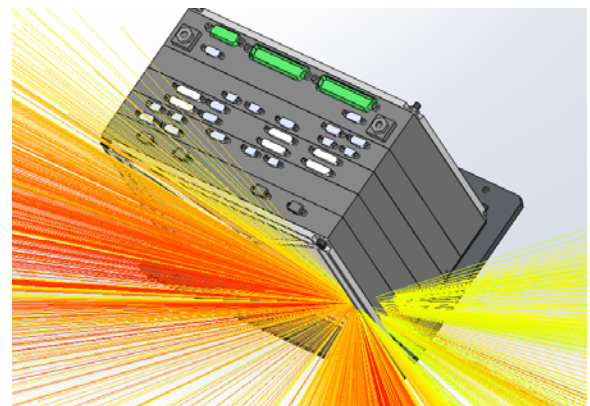
В конечном счете результатом применения такого подхода является снижение затрат на разработку, снижение требований к стойкости отдельных ЭРИ, а следовательно и расширение перечня возможной к применению ЭКБ, обеспечение требуемого срока эксплуатации БА в КА с длительными сроками активного существования.



а



б



в

Рис. 1. Применение программного комплекса для оценки дозовых нагрузок:  
 а – трассирующие лучи показывают экранирование ЭРИ элементами конструкции блока (вид сбоку);  
 б – ход лучей и их пересечения с материалами блока и плат (вид на плату сверху);  
 в – общий вид блока с указанием наиболее слабо защищенных направлений

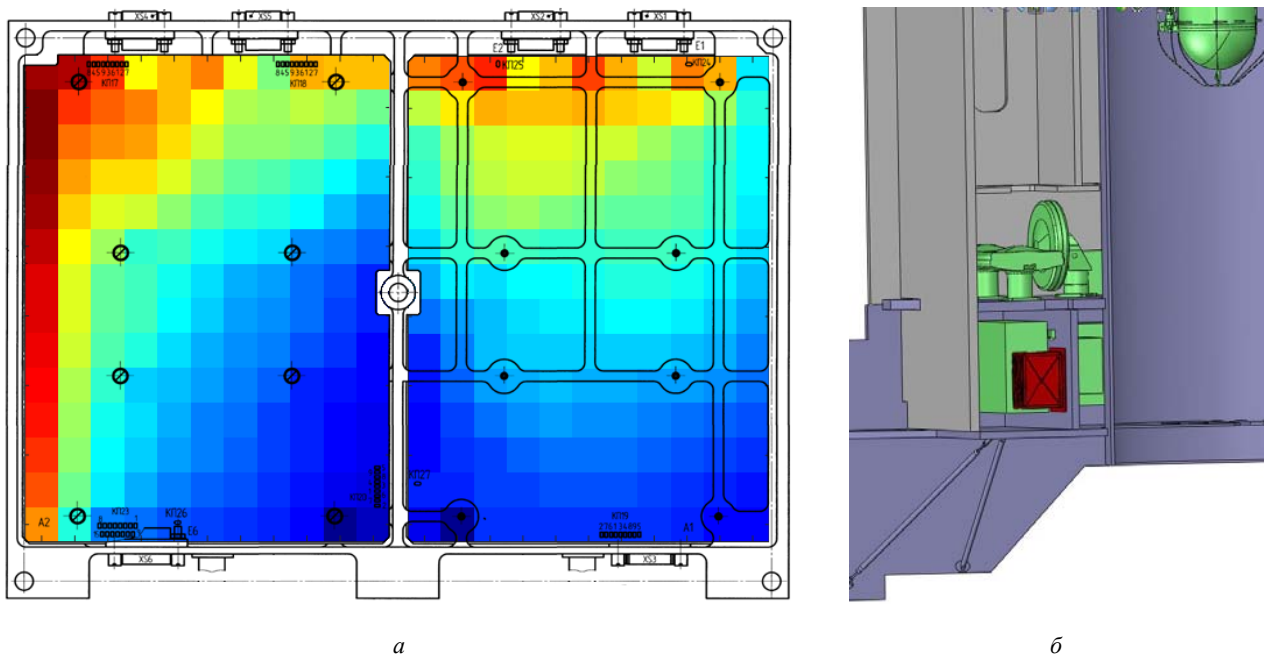


Рис. 2. Распределение дозовых нагрузок для одной из рамок блока:  
 а – распределение доз по платам рамки; б – расположение блока относительно КА

#### Библиографические ссылки

1. ОСТ 134-1034–2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. М. : Российское космическое агентство, 2012.
2. ECSS-E-ST-10-12C Methods for the calculation of radiation received and its effects and a policy for the design margin // ECSS Secretariat ESA-ESTEC. 2008. 105 p.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы. Программный комплекс для проведения анализа радиационной стойкости к дозовым эффектам // А. С. Шаура, Д. С. Шаура, Г. Н. Шерстенникова, С. П. Шемякин ; заявитель и правообладатель АО «Ижевский радиозавод». № 2018612828 ; заявл. 09.01.2018 ; зарег. 01.03.2018.
4. Sherstennikova G. N., Shaura A. S. Determination of total ionization dose by ray trace analysis based on geodesic sphere // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. № 1 (19). С. 98–105.

#### References

1. OST 134-1034–2012. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovaniye kosmicheskikh apparatov. Metody ispytaniy i otsenki stoykosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu elektronnoy i protonnogo izlucheniya kosmicheskogo prostranstva po dozovym effektam. M. : Rossiyskoye Kosmicheskoye Agentstvo, 2012.
2. ECSS-E-ST-10-12C Methods for the calculation of radiation received and its effects and a policy for the design margin // ECSS Secretariat ESA-ESTEC, 2008. 105 p.
3. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy. Programmnyy kompleks dlya provedeniya analiza radiatsionnoy stoykosti k dozovym effektam // A. S. Shaura, D. S. Shaura, G. N. Sherstennikova, S. P. She-myakin ; zayavitel' i pravoobladatel' JSC "Izhevskiy radiozavod". № 2018612828 ; zayavl. 09.01.2018 ; zareg. 01.03.2018.
4. Sherstennikova G. N., Shaura A. S. Determination of total ionization dose by ray trace analysis based on geodesic sphere // Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii. 2018. № 1 (19). P. 98–105.

© Шерстенникова Г. Н., Шаура А. С., 2019



**Секция**

**«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА  
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 004.072.2

## ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТНО-ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ МАРКИРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОЕННОГО И КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Горбась, Н. А. Конькова, В. В. Кузьмин\*, А. А. Пономарев

ФГУП «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации  
Российская Федерация, 111123, г. Москва, Свободный просп., 4

\*E-mail: vkuzmin.mail@gmail.com

*Представлены результаты разработки технологии химической маркировки, обеспечивающей оперативную аутентификацию электронных компонентов, используемых в военной и космической технике.*

*Ключевые слова: электронные компоненты военного и космического назначения, химическая маркировка, идентификационные признаки, аутентификация, спектральный анализ.*

## THE PROTECTIVE-IDENTIFICATION TECHNOLOGY OF CHEMICAL MARKING MILITARY AND SPACE FUNCTION ELECTRONIC COMPONENTS

A. V. Gorbas, N. A. Konkova, V. V. Kuzmin, A. A. Ponomarev\*

FSUE "18 Central Research Institute" Ministry of Defense  
4, Svobodny Av., Moscow, 111123, Russian Federation

\*E-mail: vkuzmin.mail@gmail.com

*The report sets out results of the chemical marking technology development. This technology provides efficient authentication electronic components for military and space function.*

*Keywords: military and space function electronic components, chemical marking, identification features, authentication, spectral analysis.*

Угрозы, связанные с применением контрафактной электронной компонентной базы (ЭКБ), особенно в образцах военной и космической техники, требуют создания эффективной системы противодействия. Одним из технических компонентов такой системы может стать предлагаемая технология химической маркировки корпусов ЭКБ.

Широко распространенная лазерная маркировка легко поддается подделке и не обеспечивает надежной аутентификации ЭКБ. Предлагаемая ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ химическая маркировка лишена указанного недостатка, так как обладает идентификационными признаками трех уровней: визуальными, инструментально выявляемыми и экспертными. Отличительной особенностью технологии является использование многокомпонентных маркировочных составов, содержащих химические соединения, обладающие люминесценцией в видимой области спектра, инструментально выявляемой инфракрасной люминесценцией, а также признаками, выявляемыми методами рентгено-флуоресцентного анализа и спектрометрии комбинационного рассеяния. Использование

в маркировочном составе сочетания различных соединений позволяет создать множество композиций с уникальным набором идентификационных признаков.

Разработанные маркировочные составы обеспечивают долговременную сохранность идентификационных признаков, высокую адгезию к материалам корпусов ЭКБ, термическую стабильность и механическую прочность.

Используемые методы инструментальной идентификации не оказывают деструктивного воздействия на электронные компоненты и обеспечивают достоверность и оперативность регистрации идентификационных признаков.

Разработанная ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ технология успешно применяется для маркировки электронных компонентов, прошедших сертификационные испытания, обеспечивая их надежную и оперативную аутентификацию.

© Горбась А. В., Конькова Н. А.,  
Кузьмин В. В., Пономарев А. А., 2019

## СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ КОНТРАФАКТНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

И. П. Горбачев, Т. Ю. Корбанкова, А. Я. Кулибаба, А. А. Сашов

АО «Российские космические системы»  
Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53  
E-mail: ncseo@spacecorp.ru

*Проблема контрафакта в области электронной компонентной базы (ЭКБ) сегодня особенно актуальна в ракетно-космическом приборостроении. Надежность бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космической техники в большой степени определяется качеством ЭКБ.*

*Показана нормативная документация, регламентирующая противодействие контрафакту и фальсификации в области ЭКБ. Приведены наиболее результативные методы исследования на предмет наличия признаков контрафактной ЭКБ. Отражены результаты исследований ЭКБ, снятой с производства, на предмет наличия признаков контрафактной продукции. Даны предложения по недопущению применения контрафактной ЭКБ.*

*Ключевые слова:* электронная компонентная база, контрафактное изделие.

## METHODS OF DETECTING COUNTERFEIT ELECTRONIC PARTS SIGNS

I. P. Gorbachev, T. Yu. Korbankova, A. Ya. Kulibaba, A. A. Sashov

JSC “Russian Space Systems”  
53, Aviamotornaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation  
E-mail: ncseo@spacecorp.ru

*The problem of counterfeiting of electronic parts today is especially relevant in rocket and space technology. Reliability of on-board electronic equipment strongly depends on the quality of electronic parts.*

*The normative documentation for regulating counteraction to counterfeiting and falsification of the electronic parts is shown. The most effective research methods of counterfeit electronic parts signs are described. The results of studies of counterfeit products signs in discontinued electronic parts are presented. Suggestions how to avoid counterfeit electronic parts are made.*

*Keywords:* electronic part, counterfeit product.

Проблема контрафакта в области ЭКБ актуальна как для России, так и для всего мира. Доля контрафактных электронных компонентов на мировом рынке сегодня составляет не менее 30–35 %.

В России данная проблема стоит особенно остро. В связи с этим приказом по Росстандарту от 21 ноября 2017 года № 1890 создан технический комитет ТК124 «Средства и методы противодействия фальсификациям и контрафакту». Основная задача комитета – разработка национальных и (или) межгосударственных стандартов в своей области деятельности. Перечень включает нормативные документы, ГОСТы Р. Основопологающим документом при разработке ГОСТов Р является международный SAE AS AS5553A «Counterfeit Electronic Parts; Avoidance, Detection, Mitigation and Disposition» (AEROSPACE STANDARD)

В ГОСТ Р 57882–2017 «Критерии верификации для оценки соответствия практики и методов организаций требованиям по противодействию обороту фальсифицированной и контрафактной продукции» определен план по выявлению контрафактной ЭКБ. Частью данного плана является верификация закупаемых/возвращаемых изделий.

НЦ СЭО АО «Российские космические системы» является аккредитованным испытательным центром, который оснащен технологической и нормативно – методической базой, что позволяет гарантировать выявление признаков контрафактной продукции практически в 100 % случаев.

В НЦ СЭО АО «Российские космические системы» были проведены исследования ЭРИ, снятых с производства, на предмет наличия признаков контрафактной продукции. Оказалось, что из 25 исследуемых партий интегральных схем лишь 20 % не имеют признаков контрафактной продукции.

Наиболее результативными для выявления признаков контрафакта являются следующие методы:

- контроль внешнего вида и маркировки;
- рентгеновский контроль;
- рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) материала выводов;
- акустическая микроскопия.

Детальный визуальный осмотр ЭКБ позволяет выявить значительную часть контрафактных изделий (большую долю которых составляют изделия повторно введенные в оборот) с помощью следующих видов контроля (из ГОСТ Р 57880–2017):

– контроль соответствия изделия описанию изготовителя в части размеров изделия, числа выводов (контактов) и т. д.;

– контроль состояния выводов на наличие различных дефектов (следы обработки, неровности, царапины и т. д.);

– контроль соединений столбиков CGA и шариков BGA на наличие различных дефектов (изменение цвета, грязи и налета на выводах, царапин, излишек припоя);

– контроль маркировки на наличие признаков контрафактности (различия в стиле маркировки, обозначении страны, логотипе изделия в сравнении с изделием, полученным от действительного изготовителя, следов старой маркировки и т. д.);

– контроль неоднородностей корпусов ЭКБ на наличие неодинаковой толщины, углублений неодинаковой глубины, видимых царапин в одном направлении, различий в радиусе углов на верхней и нижней поверхностях, трещин или видимых повреждений, различие в цвете верха и низа изделия.

Рентгеновский контроль позволяет при помощи ионизирующего излучения оценить внутреннюю структуру изделий ЭКБ на наличие дефектов, выявить изделия с признаками контрафакта.

Отсутствие идентичности внутренней структуры изделий в рамках одной партии является главным признаком ЭКБ контрафактного происхождения.

Акустическая микроскопия позволяет обнаружить физические дефекты изделий ЭКБ, является наиболее результативным методом по обнаружению повторной маркировки пластиковых корпусов (так как позволяет проводить послойный анализ на различных глубинах).

Рентгеноспектральный микроанализ позволяет определить химический (элементный) состав исследуемого объекта.

РСМА применяется для определения качественного и количественного состава материала. Данные, полученные с помощью РСМА должны соответствовать заявленным в документации производителя. Расхождение результатов свидетельствует о повторном использовании изделий после демонтажа из аппаратуры (например, повторное нанесение шариковых выводов BGA микросхем – реболлинг).

Как правило, применение комплекса методов помогает провести наиболее полный анализ и с большой долей вероятности определить происхождение ЭКБ.

В целях недопущения применения ЭКБ контрафактного происхождения предлагается дополнить программы испытаний ЭКБ указанными испытаниями, а также операцией РФА в объеме, предусмотренном РД В 319.04.47 с дополнительными процедурами (согласно стандарту MIL-STD-1580 Destructive physical analysis for electronic, electromagnetic, and electromechanical parts):

– внешний визуальный осмотр при увеличении до 100<sup>x</sup> и более;

– внутренний визуальный контроль, фотографирование кристалла;

– элементный анализ материалов металлических покрытий и внешних выводов.

Указанные дополнительные испытания целесообразно вводить для ЭКБ, наиболее часто фальсифицируемых (ИС, дискретные полупроводниковые приборы, ИВЭП, ЭРИ снятые с производства).

Важно накапливать базу акустических изображений ЭКБ, рентгенограмм, а также фотоснимков РФА внутренней структуры ЭКБ по производителям и типам для анализа вновь поступивших партий.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 57882-2017. Критерии верификации для оценки соответствия практики и методов организаций требованиям по противодействию обороту фальсифицированной и контрафактной продукции. М. : Статдартинформ, 2017.

2. ГОСТ Р 57880-2017. Предотвращение получения, методы обнаружения, сокращение рисков применения и решения по использованию фальсифицированной и контрафактной продукции. М. : Статдартинформ, 2017.

#### References

1. GOST R 57882–2017. Verification criteria for conformance assessment of practices and methods of organizations to the requirements for avoidance of fraudulent and counterfeit products. Moscow, Statdartinform, 2017.

2. GOST R 57880–2017. Mitigation, detection, avoidance and disposition of fraudulent and counterfeit products. Moscow, Statdartinform, 2017.

© Горбачев И. П., Корбанкова Т. Ю., Кулибаба А. Я., Сашов А. А., 2019

УДК 629.054

## НОВЫЕ ПЛИС ЕВРОПЕЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ КА

А. В. Королев<sup>1</sup>, В. Муаллем<sup>2</sup>, К. В. Бердичевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «СДС»

Российская Федерация, 191014, г. Санкт-Петербург, ул. Маяковского, д. 12а

<sup>2</sup>3D PLUS

408, rue Hélène Boucher – ZI, 78532 BUC, France

E-mail: A.Korolev@sdsolutions.ru<sup>1</sup>, wmuallem@3d-plus.com<sup>2</sup>

*Описан новый вычислительный модуль для применения в бортовой аппаратуре КА, содержащий радиационностойкую ПЛИС и различные типы ИС памяти. Приведены технические характеристики. Рассмотрена конструкция модуля и несколько вариантов его конфигурации для применения в различных системах КА.*

*Ключевые слова: ПЛИС, радиационная стойкость, космический аппарат.*

## NEW EUROPEAN FPGA FOR SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT

A. V. Korolev<sup>1</sup>, W. Mouallem<sup>2</sup>, K. V. Berdichevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SDS LLC

12a, Mayakovskogo Str., Saint-Petersburg, 191014, Russian Federation

<sup>2</sup>3D PLUS

408, rue Hélène Boucher – ZI, 78532 BUC, France

E-mail: A.Korolev@sdsolutions.ru<sup>1</sup>, wmuallem@3d-plus.com<sup>2</sup>

*A new computing module for use in spacecraft onboard equipment containing radiation-hardened FPGA and various types of IC memory is described. The technical characteristics are given. The design of the module and several variants of its configuration for use in various spacecraft systems are considered.*

*Keywords: FPGA, radiation-hardened, spacecraft.*

Бортовая радиоэлектронная аппаратура (РЭА) космического аппарата является одним из основных средств, обеспечивающих его надёжное функционирование и заданные технические характеристики. В последние годы происходит быстрое развитие технологий создания интегральных схем (ИС), применяемых в РЭА космических аппаратов, и номенклатура ИС постоянно пополняется новыми изделиями. Каждое новое изделие обладает более высокой надёжностью, производительностью и имеет более низкую стоимость по сравнению с применяемыми ранее. Компания 3D PLUS (Франция) уже более 20 лет занимается разработкой и производством высоконадёжных модулей памяти для ответственных применений, в том числе и для применений в космической технике. С развитием технологий и ростом потребностей заказчиков инженеры компании 3D PLUS начали работать над более сложными устройствами и создали модуль космического уровня качества FUSIO RT, представляющий собой компьютерное

ядро на основе ПЛИС NanoXplore европейского производства. Наличие ПЛИС в этом компактном модуле обеспечивает высокую гибкость и производительность разрабатываемой системы, а также оптимизацию затрат.

Модуль FUSIO RT построен на основе блочной архитектуры, состоящей из трех блоков: базовый блок содержит ПЛИС со встроенным микропроцессором и конфигурационное ПЗУ, опциональные блоки содержат ОЗУ и дополнительное ПЗУ для хранения данных.

Модуль FUSIO RT, разработанный компанией 3D PLUS по заказу национального центра космических исследований Франции (CNES) для применения в космической отрасли, обладает такими ключевыми преимуществами, как миниатюризация, радиационно-стойкая конструкция, блочная архитектура и длительный срок технической поддержки.

© Королев А. В., Муаллем В.,  
Бердичевский К. В., 2019



## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

А. Я. Кулибаба, А. А. Сашов, М. К. Суконкин, А. Ю. Штукарев

АО «Российские космические системы»  
Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53  
E-mail: ncseo@spacecorp.ru

*Электронная компонентная база (ЭКБ) для ракетно-космической техники (РКТ) подвергается входному контролю и дополнительным испытаниям в испытательных центрах. Благодаря этому, за счет выявления бракованных и потенциально ненадежных изделий, снижается средняя по партии интенсивность отказов ЭКБ. Количественно данный вклад испытаний можно оценить путем введения понижающего коэффициента  $K_{И}$ , на который умножается справочное значение интенсивности.*

*Значения  $K_{И}$  можно оценить следующими путями:*

- с помощью статистики отбраковки ЭКБ в испытательных центрах;
- сравнительным анализом коэффициентов, характеризующих уровень качества, приведенных в справочниках по надежности ЭКБ.

*После определения  $K_{И}$ , его можно использовать при проектной оценке надежности аппаратуры РКТ.*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, электронная компонентная база, надежность, дополнительные испытания.*

## ANALYSIS OF INFLUENCE OF INCOMING INSPECTION AND ADDITIONAL TESTS ON THE RELIABILITY OF THE ELECTRICAL, ELECTRONIC AND ELECTROMECHANICAL (EEE) PARTS

A. Ya. Kulibaba, A. A. Sashov, M. K. Sukonkin, A. Yu. Shtukarev

JSC "Russian Space Systems"  
53, Aviamotornaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation  
E-mail: ncseo@spacecorp.ru

*Electrical, electronic and electromechanical (EEE) parts for rocket and space equipment are subjected to incoming inspection and additional tests. By detecting defective and potentially unreliable EEE parts, the average failure rate decreases. Quantitatively, additional tests' contribution can be represented by a multiplying coefficient.*

*Keywords: rocket and space equipment, electrical, electronic and electromechanical parts, EEE parts reliability, additional tests.*

При разработке космической техники большое внимание уделяется ее надежности из-за невозможности обслуживания (ремонта) на орбите. В настоящее время постоянно возрастают требования к вероятности безотказной работы и срокам активного существования (САС) изделий. На настоящий момент существует несколько проблем:

– справочники по надежности ЭКБ не перевыпускались с 2006 года и не учитывают статистику по отказам ЭКБ за последние 13 лет;

– не учитывается, что на протяжении почти 30 лет постоянно совершенствуются методы и средства входного контроля (далее – ВК) (в том числе переход от выборочного к сплошному ВК ЭКБ) и дополнительных испытаний (далее – ДИ).

В связи с этим есть основания предполагать, что существует потребность в поправочных коэффициентах  $K_{И}$ , которые учитывают влияние ВК и ДИ на надежность изделий ЭКБ. Данные коэффициенты могут

быть использованы при проектной оценке надежности аппаратуры РКТ.

Значения этих коэффициентов можно оценить различными путями, рассмотрим два способа: с помощью статистики отбраковки ЭКБ в испытательных центрах и сравнительный анализ различных уровней качества изделий, приведенных в справочниках по надежности ЭКБ.

Оценить коэффициенты влияния ВК и ДИ на надежность изделий ЭКБ можно на основе статистики отказов ЭКБ при проведении испытаний в испытательных центрах. Для этого следует воспользоваться методикой, предложенной в [3]. Используя данную методику и статистику выявленных при проведении ВК и ДИ отказов изделий различных групп ЭКБ в АО «Российские космические системы» за 2018 год, были получены оценки влияния проводимых испытаний на надежность ЭКБ, которые приведены в табл. 1 и 2.

В зарубежной документации при расчете надежности возможен учет влияния испытаний на надежность изделий ЭКБ. Так, в [4; 5] получение расчетной оценки надежности изделий производится с учетом четко определенных для всех типов ЭКБ уровней качества, которые учитывают требования к изготовлению и объемы проводимых испытаний. Поэтому другим путем получения оценок коэффициентов может быть сравнительный анализ коэффициентов для различных уровней качества изделий, приведенных в справочниках по надежности ЭКБ. В табл. 3 рассчитаны коэффициенты  $K_{И}$  между двумя уровнями качества, по

которым можно судить о вкладе, вносимом испытаниями в уменьшение интенсивности отказов ЭКБ.

При анализе данных в табл. 1–3 можно отметить, что эксплуатационная интенсивность отказов для изделий ЭКБ не прошедших ВК и ДИ ( $\lambda_2$ ) снижается при включении ВК и ДИ ( $\lambda_1$ ) в среднем в два раза. Данный факт говорит о необходимости введения коэффициентов  $K_{И}$ , позволяющих учесть проведение ВК и ДИ.

В связи с тем, что коэффициенты, полученные разными способами, сильно разнятся, требуется их экспериментальное подтверждение.

Таблица 1

Оценка коэффициентов влияния ВК и ДИ на интенсивность отказов партий ЭКБ, изготавливаемой по ТУ, по статистике испытаний АО «Российские космические системы» за 2018 г.

Класс ЭКБ	Количество испытанной ЭКБ (N), шт.	Количество отказов на ВК и ДИ (R), шт.	Ожидаемое число отказов за САС, шт.		Ожидаемая интенсивность отказов, ч <sup>-1</sup>		$K_{И} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$
			с ВК и ДИ ( $r_1$ )	без ВК и ДИ ( $r_2 = R + r_1$ )	с ВК и ДИ ( $\lambda_1$ )	без ВК и ДИ ( $\lambda_2$ )	
Микросхемы	36067	230	1039	1269	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$3,76 \cdot 10^{-7}$	0,82
Транзисторы	10152	70	185	255	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$2,90 \cdot 10^{-7}$	0,74
Диоды	31949	274	945	1219	$3,19 \cdot 10^{-7}$	$4,08 \cdot 10^{-7}$	0,78
Оптроны	937	11	13	24	$2,58 \cdot 10^{-7}$	$4,06 \cdot 10^{-7}$	0,63
Конденсаторы	96731	256	995	1251	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$1,38 \cdot 10^{-7}$	0,80
Резисторы	205876	98	494	592	$2,66 \cdot 10^{-8}$	$3,16 \cdot 10^{-8}$	0,84
Индуктивности	1328	0	3	3	$7,56 \cdot 10^{-8}$	$7,56 \cdot 10^{-8}$	1,00
Соединители	26409	339	41	380	$2,22 \cdot 10^{-8}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$	0,14
Фильтры	859	7	28	35	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$5,98 \cdot 10^{-7}$	0,84
Генераторы	1044	7	5	12	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$2,19 \cdot 10^{-7}$	0,57
Реле	6486	138	65	203	$1,33 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-7}$	0,36

Примечание. R – число отказов на ВК и ДИ ЭКБ;  $r_1$  – число отказов за САС по [1];  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – верхняя доверительная граница интенсивности отказов ( $\lambda_1 = \chi^2(\alpha, r_1) / (2 \cdot N \cdot \text{САС})$ ,  $\lambda_2 = \chi^2(\alpha, r_2) / (2 \cdot N \cdot \text{САС})$ ), где  $\chi^2(\alpha, k)$  – квантиль  $\chi^2$  распределения с  $k$  степенями свободы и уровнем значимости  $\alpha = 0,1$ ; для примера вычисления  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  САС = 100 000 часов ( $K_{И}$  не зависит от САС).

Таблица 2

Оценка коэффициентов влияния ВК и ДИ на интенсивность отказов партий ЭКБ, изготавливаемой без ТУ, по статистике испытаний АО «Российские космические системы» за 2018 г.

Класс ЭКБ	Количество испытанной ЭКБ (N), шт.	Количество отказов на ВК и ДИ (R), шт.	Ожидаемое число отказов за САС, шт.		Ожидаемая интенсивность отказов, ч <sup>-1</sup>		$K_{И} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$
			с ВК и ДИ ( $r_1$ )	без ВК и ДИ ( $r_2 = R + r_1$ )	с ВК и ДИ ( $\lambda_1$ )	без ВК и ДИ ( $\lambda_2$ )	
Микросхемы	40589	1097	1732	2829	$4,51 \cdot 10^{-7}$	$7,28 \cdot 10^{-7}$	0,62
Транзисторы	9795	134	42	176	$6,10 \cdot 10^{-8}$	$2,14 \cdot 10^{-7}$	0,29
Диоды	21667	590	80	670	$4,77 \cdot 10^{-8}$	$3,38 \cdot 10^{-7}$	0,14
Оптроны	7698	395	574	969	$8,21 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	0,61
Конденсаторы	156982	1418	280	1698	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	0,18
Резисторы	158183	229	196	425	$1,46 \cdot 10^{-8}$	$3,01 \cdot 10^{-8}$	0,49
Индуктивности	10395	147	15	162	$2,57 \cdot 10^{-8}$	$1,87 \cdot 10^{-7}$	0,14
Соединители	13161	7	37	44	$4,09 \cdot 10^{-8}$	$4,72 \cdot 10^{-8}$	0,87
Фильтры	1995	11	27	38	$2,09 \cdot 10^{-7}$	$2,76 \cdot 10^{-7}$	0,76

Примечание. R – число отказов на ВК и ДИ ЭКБ;  $r_1$  – число отказов за САС по [2];  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – верхняя доверительная граница интенсивности отказов ( $\lambda_1 = \chi^2(\alpha, r_1) / (2 \cdot N \cdot \text{САС})$ ,  $\lambda_2 = \chi^2(\alpha, r_2) / (2 \cdot N \cdot \text{САС})$ ), где  $\chi^2(\alpha, k)$  – квантиль  $\chi^2$  распределения с  $k$  степенями свободы и уровнем значимости  $\alpha = 0,1$ ; для примера вычисления  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  САС = 100 000 часов ( $K_{И}$  не зависит от САС).

Значения коэффициентов, учитывающих уровень качества

Группа ЭКБ	Эксплуатационная интенсивность отказов для уровня качества, ч <sup>-1</sup>		$K_n = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$
	MIL-SPEC ( $\lambda_1$ )	Lower ( $\lambda_2$ )	
Микросхемы	$4,26 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	0,30
Диоды	$3,68 \cdot 10^{-8}$	$7,85 \cdot 10^{-8}$	0,47
Транзисторы	$4,26 \cdot 10^{-8}$	$8,17 \cdot 10^{-8}$	0,52
Конденсаторы	$1,78 \cdot 10^{-8}$	$5,10 \cdot 10^{-8}$	0,35
Резисторы	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$4,58 \cdot 10^{-8}$	0,27
Индуктивности	$1,40 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	0,28
Соединители	$2,77 \cdot 10^{-8}$	$5,24 \cdot 10^{-8}$	0,53
Фильтры	$1,33 \cdot 10^{-7}$	$3,91 \cdot 10^{-7}$	0,34

*Примечание.* MIL-SPEC присваивается изделию, изготовленному в полном соответствии с применяемой спецификацией на ЭКБ высокой надежности; Lower присваивается изделию, при несоблюдении требований производства или коммерческому изделию.

Для этого в качестве предложения, рассматривается получение количественных оценок значений коэффициентов влияния ВК и ДИ на надежность партий ЭКБ, на основе экспериментальных значений эксплуатационной интенсивности отказов, определенных по результатам испытаний. Оценка эксплуатационной интенсивности отказов проводится с помощью ускоренных испытаний групп ЭКБ прошедших и групп ЭКБ не прошедших ВК и ДИ, с последующим анализом результатов и получением коэффициентов влияния испытаний на надежность партий исследуемых групп ЭКБ.

#### Библиографические ссылки

1. Надежность электрорадиоизделий: справочник. 2004. 620 с.
2. Надежность ЭРИ ИП : справочник. 2006. 52 с.
3. Нормативный документ по стандартизации РКТ. Требования, объем и порядок проведения дополнительных испытаний электрорадиоизделий для комплектования автоматических космических аппаратов длительного функционирования: РД 134-0165-2009. СПб. : Электронстандарт, 2009. 199 с.
4. MIL-HDBK-217F military handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Washington DC: 1991. 205 p.

5. MIL-HDBK-217F Notice 2 military handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Washington DC: 1995. 80 p.

#### References

1. Nadezhnost' jelektroradioizdelij: spravochnik [The reliability of electronic equipment: a handbook.]. 2004. 620 p.
2. Nadezhnost' JeRI IP: spravochnik [Reliability of electronic equipment of foreign production: a handbook.]. 2006. 52 p.
3. RD 134-0165-2009 [Requirements, volume and procedure for additional testing of electronic equipment for the assembly of automatic spacecraft]. SPb.: Elektronstandart, 2009. 199 p.
4. MIL-HDBK-217F military handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Washington DC: 1991. 205 p.
5. MIL-HDBK-217F Notice 2 military handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Washington DC: 1995. 80 p.

© Кулибаба А. Я., Сашов А. А., Суколкин М. К., Штукарев А. Ю., 2019

УДК 621.3.019.34; 004.052

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОХРАНЯЕМОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕГРАДАЦИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

А. Я. Кулибаба, М. К. Суконкин, А. Ю. Штукарёв, О. В. Юшин

АО «Российские космические системы»  
 Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53  
 E-mail: ncseo@spacecorp.ru

*Представлен обзор основных механизмов отказа при хранении изделий электронной компонентной базы. Предложен расчетно-экспериментальный метод оценки показателей сохраняемости изделий электронной компонентной базы на основе анализа постепенных отказов и проведена его апробация. Приведены результаты эксперимента.*

*Ключевые слова: сохраняемость, электронная компонентная база, ускоренные испытания на сохраняемость.*

## A METHOD FOR ELECTRICAL, ELECTRONIC AND ELECTROMECHANICAL (EEE) PARTS STORAGE LIFE ASSESSMENT BASED ON PARAMETER DEGRADATION ANALYSIS

A. Ya. Kulibaba, M. K. Sukonkin, A. Yu. Shtukarev, O. V. Yushin

JSC "Russian Space Systems"  
 53, Aviamotornaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation  
 E-mail: ncseo@spacecorp.ru

*The report provides an overview of failure mechanisms during storage of EEE parts. Authors propose a method for EEE parts storage life assessment based on parameter degradation analysis. The report includes experimental results.*

*Keywords: storage life, electrical, electronic and electromechanical parts, EEE parts reliability, accelerated storage life test.*

Сегодня имеется тенденция увеличения сроков службы аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), которые сейчас уже могут превышать 20 лет. Как следствие, растут и требования к сроку сохраняемости используемых изделий электронной компонентной базы (ЭКБ). Из-за возросших требований к ЭКБ особенно остро проблема подтверждения надёжности стоит для изделий, изготовленных в рамках опытно-конструкторских работ, при сертификации изделий ЭКБ и при получении протоколов разрешения применения.

Для решения поставленной проблемы предлагается использовать методику ускоренных испытаний на сохраняемость (УИС) на основе прогнозирования деградации параметров по временной зависимости (анализа возникновения постепенных отказов). При этом вероятность возникновения случайных отказов учитывается косвенным образом при установлении приемочного числа равным нулю.

Перед проведением испытаний проводится сериализация изделий и контроль всех ПКГ. Затем, если изделия герметичные, их испытывают на воздействие повышенной температуры среды при хранении. Если изделия не герметичные, то их испытывают на комбинированное воздействие повышенной температуры среды при хранении и повышенной влажности воздуха. В процессе УИС для всех изделий проводятся многократные измерения ПКГ в определенные мо-

менты времени (временные сечения). Количество временных сечений должно быть не менее 3 шт. Пример этапов измерений ПКГ приведен на рис. 1.

В ходе ускоренных испытаний проводится контроль ПКГ. В результате получается массив результатов измерений ПКГ  $\Pi_{ijn}$  ( $i$  – текущий номер серии измерений  $\Pi$ ;  $j$  – текущий номер этапа измерений  $\Pi$ ;  $n$  – текущий номер изделия), пример которого представлен на рис. 1. Для исключения в массиве  $\Pi_{ijn}$  аномальных выбросов (грубых промахов) используется критерий Граббса [1]. Исходя из массива  $\Pi_{ijn}$  получается массив средних значений ПКГ по сериям измерений.

Для дальнейших расчетов считается, что математическое ожидание ПКГ в выборке деградирует по линейному закону  $\Pi_i(t)$ :

$$\Pi_i(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot t,$$

где  $\beta_0$  и  $\beta_1$  – коэффициенты, вычисляемые по методу наименьших квадратов [2]. Если коэффициент  $\beta_1$  положителен, то деградация ПКГ считается положительной. В противном случае деградация ПКГ считается отрицательной.

В качестве линии регрессии  $\Pi_i(t)$  применяются и другие функции (например, экспоненциальную), которые следует выбирать исходя из физики деградации ПКГ.

Наличие деградации математического ожидания ПКГ определяется путем статистического сравнения найденной линии регрессии  $\Pi_i(t)$  со средним значением ПКГ по критерию Фишера [3]. Если имеется

деградация ПКГ, то для дальнейших расчетов необходимо использовать линию регрессии  $\Pi_{ij}(t)$ . В противном случае испытания продолжают до проявления деградации или до достижения заданного объема.

Доверительная зона представляет собой область, в пределах которой линия регрессии может изменяться с доверительной вероятностью  $P_{\text{дов}}$ . Доверительная зона имеет границы  $\Pi_{\min}(t)$  и  $\Pi_{\max}(t)$  [4]. Пример доверительной зоны приведен на рис. 2.

Значение оценки гамма-процентного срока сохраняемости изделия в условиях проведения УИС  $T_{c,\gamma,\text{УИС}}$  может быть получено при решении одного из следующих уравнений:

$$\begin{cases} \Pi_{\max}(t = T_{c,\gamma,\text{УИС}}) = \Pi_{\text{кр.маx}} - z_{\gamma} \cdot S_{\text{ср}}, & \text{если деградация ПКГ положительная;} \\ \Pi_{\min}(t = T_{c,\gamma,\text{УИС}}) = \Pi_{\text{кр.миn}} + z_{\gamma} \cdot S_{\text{ср}}, & \text{если деградация ПКГ отрицательная,} \end{cases}$$

где  $z_{\gamma}$  – значение квантиля нормального распределения (с математическим ожиданием равным 0 и среднеквадратическим отклонением равным 1);  $\Pi_{\text{кр.маx}}$ ,  $\Pi_{\text{кр.миn}}$  – нормы ПКГ;  $S_{\text{ср}}$  – оценка стандартного отклонения ПКГ.

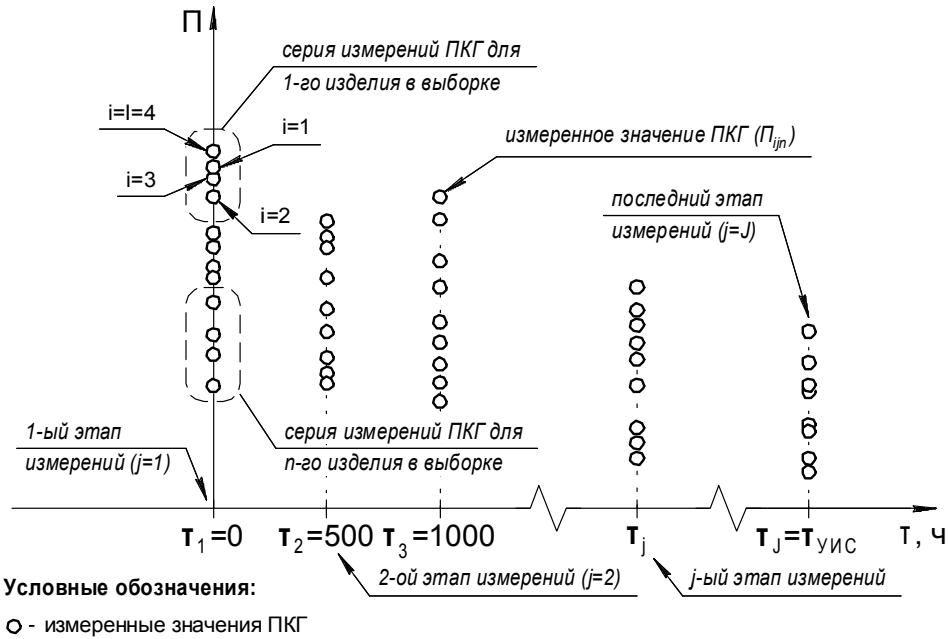


Рис. 1. Пример результатов измерений ПКГ

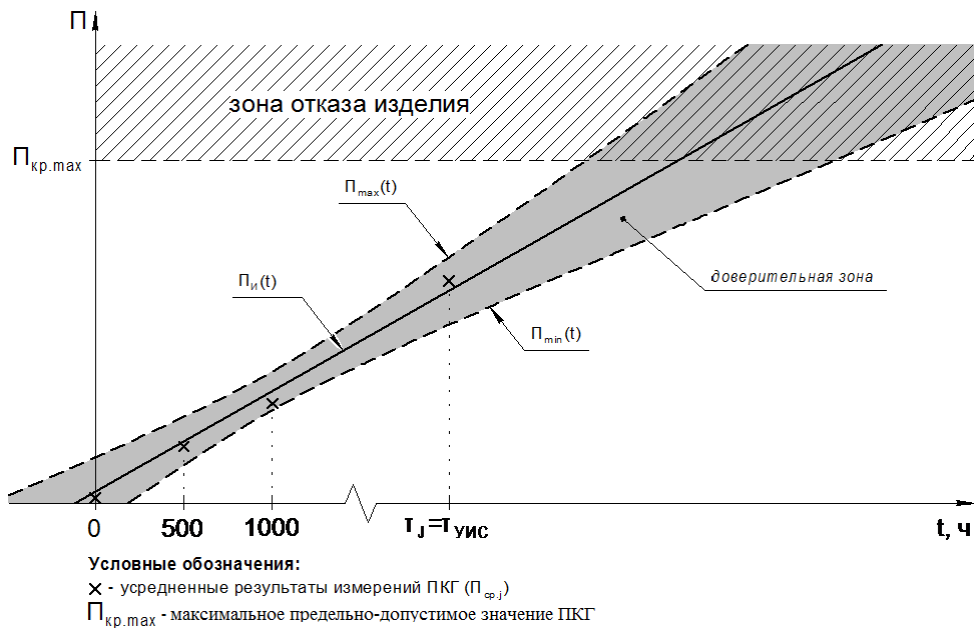


Рис. 2. Пример доверительного интервала для линии регрессии

Значение оценки гамма-процентного срока сохранности в нормальных условиях хранения  $T_{с.γ.норм}$  вычисляется по формуле

$$T_{с.γ.норм} = T_{с.γ.УИС} \cdot K_y,$$

где коэффициент ускорения  $K_y$  вычисляется по формуле [5]:

$$K_y = \left( \frac{\varphi_{пред}}{\varphi_{норм}} \right)^m \times \exp \left[ \frac{E_a}{k_B} \cdot \left( \frac{1}{\theta_{норм} + 273} - \frac{1}{\theta_{пред} + 273} \right) \right],$$

если изделия негерметичные;

$$K_y = \exp \left[ \frac{E_a}{k_B} \cdot \left( \frac{1}{\theta_{норм} + 273} - \frac{1}{\theta_{пред} + 273} \right) \right],$$

если изделия герметичные,

где  $\varphi_{норм}$  – максимальный уровень относительной влажности среды, который может быть достигнут при нормальных условиях хранения изделий, % ( $\varphi_{норм} = 55$  %);  $\varphi_{пред}$  – максимальный уровень относительной влажности среды, который допускается фирмой-производителем изделия при предельных условиях хранения, % (для испытаний);  $\theta_{норм}$  – максимальная температура среды, которая может быть достигнута при нормальных условиях хранения изделий, °C ( $\theta_{норм} = 15$  °C);  $\theta_{пред}$  – максимальная температура окружающей среды, которая допускается фирмой-производителем изделия при предельных условиях хранения, °C (уровень для испытаний);  $E_a$  – энергия активации, типовое значение равно 0,7 эВ;  $k_B$  – постоянная Больцмана, равная  $8,617164 \cdot 10^{-5}$  эВ/К;  $m$  – коэффициент влияния влажности, равный 2,66.

При положительных результатах обработки данных проводят кратковременные испытания на безотказность изделий.

Одной из проблем использования ЭКБ в высоконадёжных изделиях (системах, комплексах) РКТ является порядок подтверждения её сохранности. Использование анализа деградации ПКГ в описанной выше методике позволяет повысить информативность расчётов, ускорить испытания, сократить размеры выборок.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов изме-

рений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введ. 2002-11-01. М. : Стандартиформ, 2002. 51 с.

2. Математическая статистика : учебник для вузов / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова и др. ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 3-е изд., исправл. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 424 с.

3. Большев Л. Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 416 с.

4. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1988. 239 с.

5. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения. Введ. 2000-07-01. М. : Стандартиформ, 2002. 59 с.

#### References

1. GOST R ISO 5725-2-2002. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2. Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Moscow, Standartinform, 2002. 51 p.

2. Mathematical statistics: Textbook for universities / V. B. Goryainov, I. V. Pavlov, G. M. Tsvetkova et al. Moscow, Publishing House of MSTU, 2008. 442 p.

3. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of mathematical statistics]. Moscow, Science, 1983, 416 p.

4. L'vovskiy E. N. [Statistical methods for constructing empirical formulas : Textbook for universities]. Moscow, Higher. sch., 1988. 239 p.

5. GOST R 51372-99. Accelerated life and storable life test methods in special aggressive and other special media for technical products, materials and systems of materials. General. Moscow, Standartinform, 2002, 51 p.

© Кулибаба А. Я., Сукокин М. К., Штукарев А. Ю., Юшин О. В., 2019

УДК 62-791.2; 681.787

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ОПРОСА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО, ВИБРАЦИОННОГО И АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. В. Куликов, И. К. Мешковский, М. Е. Ефимов, С. А. Волковский

Национальный исследовательский университет ИТМО  
Российская Федерация, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49  
\*E-mail: a.kulikov86@gmail.com

*Данная работа посвящена разработке оптоэлектронного модуля для температурного и виброакустического контроля в космических системах с помощью волоконно-оптических датчиков.*

*Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, волоконные брэгговские решетки, ракетно-космическая техника, космические системы, вибрационный контроль, акустический контроль, температурный контроль, цифровая обработка сигналов.*

## AN OPTOELECTRONIC INTERROGATION MODULE OF FIBRE-OPTIC SENSORS FOR TEMPERATURE, VIBRATION AND ACOUSTIC CONTROL IN SPACE SYSTEMS

A. V. Kulikov, I. K. Meshkovskii, M. E. Efimov, S. A. Volkovskii

ITMO University  
49 Kronverksky Av., St. Petersburg, 197101, Russia  
\*E-mail: a.kulikov86@gmail.com

*The presented work describes temperature and vibroacoustic control optoelectronic module development in space systems by fibre-optic sensors.*

*Keywords: fibre-optic sensors, fibre Bragg gratings, rocket and space technology, space systems, vibration control, acoustic control, temperature control, digital signal processing.*

**Введение.** В настоящее время электрические датчики широко используются для контроля температур, деформаций и прочих физических величин, воздействующих на космические системы. Такие датчики обладают рядом недостатков, таких как слабая надежность, подверженность коррозии и низкая помехозащищенность, что в свою очередь приводит к необходимости их защиты от пагубно влияющих на них факторов для поддержания их работоспособности. В данной работе предлагается использование их оптоволоконных аналогов – брэгговских решеток (ВБР) и интерферометров. Они обладают всеми преимуществами, традиционно ассоциирующимися с волоконно-оптическими датчиками (ВОД), такими как полная невосприимчивость к электромагнитным помехам, относительно высокая чувствительность, радиационная стойкость и работоспособность в жестких условиях [1].

На сегодняшний день, наиболее распространенными волоконно-оптическими датчиками являются датчики спектрального и интерференционного типа [2]. Спектральные ВОД получили наибольшее распространение в области измерения механических деформаций и температур. Интерференционные датчики также могут быть использованы для измерения деформаций, температур и многих других физических величин, они обладают существенно большей чувст-

вительностью по сравнению со спектральными датчиками, однако электронные устройства их опроса зачастую более сложны и имеют большую стоимость. Поэтому наибольшее распространение интерференционные датчики получили в высокоточных навигационных комплексах и виброакустических измерительных системах различного назначения. В данной работе описывается оптоэлектронный модуль для температурного, вибрационного и акустического контроля с помощью ВБР и волоконно-оптического датчика на основе интерферометра Фабри–Перо.

**Температурный и вибрационный контроль с помощью ВБР.** Построение измерительной системы деформаций и/или температур на основе ВБР достаточно просто – ВБР либо встраивается в исследуемый объект, либо закрепляется на его поверхности. Таким образом, соосные расположению механические нагрузки и температурные воздействия передаются на ВБР, изменяя ее центральную длину волны отражения.

Существует несколько подходов к анализу информационных сигналов, поступающих со спектральных датчиков. Формально их можно разделить на две группы – анализаторы спектра, использующие физическое разделение поступающего светового пучка на спектральные составляющие и метод временного сканирования заданного диапазона длин волн. К пер-

вому методу стоит отнести методы разделения оптического излучения с помощью дифракционной решетки, призмы, оптического мультиплексора, а также интерферометрический метод. К достоинствам таких методов можно отнести высокую точность определения спектрального состава входного излучения и проведение измерений в широкой полосе длин волн. Их основные недостатки – сравнительно большие габаритные размеры и вес приборов, необходимость точной настройки и калибровки (что в свою очередь накладывает ограничения на использование таких устройств в условиях агрессивного воздействия окружающей среды), а также их относительно высокая стоимость. Ко второму методу относятся методы обработки, основанные на перестройке центральной длины волны источника оптического излучения с помощью динамического изменения его внутренней температуры, а также методы, использующие дополнительную внешнюю фильтрацию излучения с помощью фильтра Фабри–Перо. В качестве косвенного информационного параметра, связывающего измеряемую величину со спектральными параметрами, используется оптическая мощность регистрируемого сигнала. Достоинства методов из второй группы – малые габаритные размеры и вес приборов, возможность использования в условиях вредного воздействия окружающей среды, возможность реализации мультиплексирования, а также относительно низкая стоимость. Недостаток – сравнительно низкая полоса проведения измерений.

Разработанный оптоэлектронный модуль опроса спектральных ВОД относится ко второй группе [3]. Оно выполнено в герметичном защищенном от электромагнитного излучения (ЭМИ), вибростойком корпусе, размером 100×150×75 мм с рабочем температурным диапазоном от минус 55 до 65 °С. Диапазон измеряемых длин волн Брэгга составляет не менее 3 нм с частотой дискретизации не менее 5 кГц на канал [3], что соответствует диапазону измерения деформаций в размере 0,25 % (2500 микрострейн) или температурному диапазону 272 °С [4]. Для увеличения диапазона измеряемых деформаций могут быть применены либо конструкционные технические решения, либо применены особые структурированные ВБР состоящие из нескольких брэгговских отражателей, физически расположенных в одном месте, но имеющих различные длины волн. Помимо этого, устройство способно опрашивать ВБР с фазовым сдвигом, представляющих собой два локальных максимума отражения и минимум между ними, ширина на полувысоте которого не превышает 100 пм, что позволяет повысить точность измерений.

**Акустический контроль с помощью интерферометра Фабри–Перо.** Неразрушающий контроль методом акустической эмиссии (АЭ), заключается в регистрации акустических сигналов возникающих при нарушении физических свойств исследуемых материалов, т. е. возникает акустико-эмиссионный сигнал, вызванный необратимой деформацией и разрушением внутренней структуры материала, в частности разрывом одной или нескольких армирующих нитей. При регистрации сигналов АЭ, в зависимости

от количества и длительности таких сигналов принимается решение либо о выводе детали из эксплуатации, либо о продолжении ее эксплуатации, если величина отклонения показаний находится в допустимых пределах.

Волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо обладает всеми преимуществами волоконных датчиков (полной нечувствительности к электромагнитным воздействиям, пассивности, способности работать в экстремальных условиях, независимости от контура заземления и легкости мультиплексирования) и при этом имеет очень малый размер, что позволяет встраивать такие датчики в сложные композитные структуры и материалы [5–7].

Исследования показали, что внедрение малых оптических волокон (диаметром 125 мкм) в структуру композитов практически никак не влияет на характеристики прочности и жесткости, при расположении оптического волокна соосно с окружающими армирующими нитями. При статических сжатиях или растяжениях рабочие характеристики встроенных волоконно-оптических датчиков практически не меняются [8].

Разработанный оптоэлектронный модуль позволяет производить опрос до четырех акустических ВОД на основе интерферометра Фабри–Перо. Рабочий диапазон частот модуля составляет от 10 до 220 кГц, динамический диапазон 86 дБ на частоте 200 кГц и 120 дБ на частоте 10 кГц. Уровень собственных шумов оптоэлектронного модуля и чувствительность ВОД позволяют производить регистрацию сигналов от имитатора акустической эмиссии с отношением сигнал/шум (ОСШ) не менее 35 дБ. Полученное ОСШ сопоставимо со значениями, получаемыми с помощью специальных пьезоэлектрических преобразователей и существенно превышает уровень  $3\sigma$ , что обеспечивает регистрацию акустических сигналов с высокой степенью достоверности [9].

#### Библиографические ссылки

1. Буймистряк Г. Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // Control engineering Россия. 2013. № 3. С. 34–40.
2. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В. Б. Гармаш и др. // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 128–140.
3. Composite Materials Monitoring by Fiber Optic Sensors / M. E. Efimov et al. // Advanced Materials Research, 2018. Т. 1147. С. 5–11.
4. Барков Ф. Л., Беспрозванных В. Г., Ризванов Д. Г. Технология контроля и измерения деформаций на основе трехосевого волоконно-оптического датчика // Инновационная наука. 2016. № 6-2.
5. Skontorp A. Structural Integrity of Quasi-Isotropic Composite Laminates with Embedded Optical Fibers // Journal of Reinforced Plastics and Composites. TECHNOMIC PUBLISHING CO., INC. 851 New Holland Avenue, Box 3535, Lancaster, PA, 17604, USA, 2000. Vol. 19, № 13. P. 1056–1077.
6. Pan X., Liang D., Li D. Optical fiber sensor layer embedded in smart composite material and structure //



Smart Materials and Structures. IOP Publishing. 2006. Vol. 15, № 5. P. 1231–1234.

7. Skontorp A. Composites with embedded optical fibers at structural details with inherent stress concentrations // *Journal of Composite Materials*. 2002. Vol. 36, № 22. P. 2501–2515.

8. Zhou G., Sim L.M. Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review // *Smart Materials and Structures*. 2002. Vol. 11, № 6. P. 925–939.

9. Pukelsheim, Friedrich. [The three-sigma rule] // *The American Statistician*. 1994. № 48(2). P. 88–91.

#### References

1. Buymistryuk G. Ya [Fiber Optic Sensors for extreme conditions]. *Control engineering Russia*. 2013. №. 3. P. 34–40. (In Russ.).

2. Opportunities, Challenges and Prospects of fiber optic measurement systems in modern instrument / V. B. Garmash et al. // *Photon-Express*. 2005. №. 6. P. 128–140 (In Russ.).

3. Composite Materials Monitoring by Fiber Optic Sensors / M. E. Efimov et al. // *Advanced Materials Research*, 2018. T. 1147. C. 5–11.

4. Barkov F. L., Besprozvannykh V. G., Rizvanov D. G. [Deformation control and measurement technology based

on three-axis fibre-optic sensor] // *Innovation science*. 2016. № 6-2 (In Russ.).

5. Skontorp A. Structural Integrity of Quasi-Isotropic Composite Laminates with Embedded Optical Fibers // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. TECHNOMIC PUBLISHING CO., INC. 851 New Holland Avenue, Box 3535, Lancaster, PA, 17604, USA, 2000. Vol. 19, № 13. P. 1056–1077.

6. Pan X., Liang D., Li D. Optical fiber sensor layer embedded in smart composite material and structure // *Smart Materials and Structures*. IOP Publishing. 2006. Vol. 15, № 5. P. 1231–1234.

7. Skontorp A. [Composites with embedded optical fibers at structural details with inherent stress concentrations]. *Journal of Composite Materials*. 2002, Vol. 36, № 22. P. 2501–2515.

8. Zhou G., Sim L.M. [Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre-optic sensors-review]. *Smart Materials and Structures*. 2002, Vol. 11, № 6. P. 925–939.

9. Pukelsheim, Friedrich. [The three-sigma rule]. *The American Statistician*. 1994. № 48(2). P. 88–91.

© Куликов А. В., Мешковский И. К.,  
Ефимов М. Е., Волковский С. А., 2019

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ  
ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ\***

И. С. Масич, В. В. Федосов, Е. М. Краева

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

*Рассматривается применение метода оптимальных логических решающих правил для классификации электрорадиоизделий космического назначения. Рассматриваются этапы метода, на каждом из которых требуется решение задач комбинаторной оптимизации. Описываются модели и алгоритмы оптимизации.*

*Ключевые слова: классификация, логические закономерности, электронная компонентная база.*

**APPLICATION OF LOGICAL DECISION RULES FOR CLASSIFYING EEE-PARTS**

I. S. Masich, V. V. Fedosov, E. M. Kraeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: masich@sibsau.ru

*We consider the use of the method of optimal logical decision rules for classification of radio-electronic products for space applications. The stages of the method are considered, each of which requires solving combinatorial optimization problems. The optimization models and the algorithms are described.*

*Keywords: classification, logical patterns, electronic component base.*

В работе описывается применение логических решающих правил, выявляемых из набора исходных данных, для решения задачи классификации электрорадиоизделий космического применения. Исходными данными служат результаты тестовых воздействий на изделия, полученные в ходе проведения входных испытаний, а также в результате электротермотренировки изделий.

Применяемые в данной работе логические решающие правила представляют собой конъюнкции значений булевых признаков и их отрицаний или по-другому правила вида «если–то». В случае количественных признаков, которыми являются исходные данные для рассматриваемой задачи, правила представляют собой набор (конъюнкцию) условий, каждое из которых в проверке принадлежности значения количественного признака (теста) некоторому интервалу.

Таким образом, бинаризация количественного признака заключается в определении пороговых значений.

Одним из методов классификации, основанным на правилах, является метод оптимальных логических решающих правил [1].

Метод состоит из следующих этапов.

1. Определение пороговых значений для бинаризации исходных количественных признаков.
2. Выявление логических закономерностей.
3. Отбор закономерностей для построения классификатора.

Каждый из описанных этапов представляет собой решение задачи комбинаторной оптимизации в соответствии с некоторой оптимизационной моделью. Метод задействует применение алгоритмов условной псевдобулевой оптимизации [2].

Помимо собственно задачи классификации дополнительно решаются следующие задачи:

1. Задача выявления изделий, не удовлетворяющих условиям определенных закономерностей (выбросов) и изделий с ненадежной классификацией.
2. Определение наиболее значимых признаков (видов диагностических тестовых воздействий), влияющих на классификацию ЭРИ. Отсев незначимых признаков.

Описанный подход в дополнение к ранее примененному методу автоматической группировки электрорадиоизделий на основе жадных эвристических алгоритмов [3; 4] дает возможность регламентировать процедуру классификации электрорадиоизделий по производственным партиям.

\*Работа выполнена в рамках государственного задания № 2.5527.2017/8.9 Минобрнауки России.

**Библиографические ссылки**

1. Масич И. С. Метод оптимальных логических решающих правил для задач распознавания и прогнозирования // Системы управления и информационные технологии. 2019. Т. 75, № 1. С. 31–37.
2. Kazakovtsev L. A., Masich I. S. A branch-and-bound algorithm for a pseudo-boolean optimization problem with black-box functions. // Facta Universitatis, Series Mathematics and Informatics. 2018. Vol. 33, № 2. P. 337–360.
3. Разработка алгоритмического обеспечения анализа однородности партий электрорадиоизделий для комплектации РЭА КА : монография / Л. А. Казаковцев, И. С. Масич, В. И. Орлов и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 192 с.
4. Задача классификации электронной компонентной базы / Л. А. Казаковцев, В. И. Орлов, А. А. Ступина, И. С. Масич // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 55–61.

**References**

1. Masich I. S. [The method of optimal logical decision rules for recognition and forecasting problems]. // *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2019. V. 75, № 1. P. 31–37.
2. Kazakovtsev L. A., Masich I. S. A branch-and-bound algorithm for a pseudo-boolean optimization problem with black-box functions. // *Facta Universitatis, Series Mathematics and Informatics*. 2018. Vol. 33, № 2. P. 337–360.
3. [Development of algorithmic support for analysis of homogeneity of electronic and radio products for the assembly of radioelectronic equipment of space vehicles / L. A. Kazakovtsev, I. S. Masich, V. I. Orlov et al. ; *Sib. state aerospace un, Krasnoyarsk*, 2016. 192 p.
4. The problem of classification of electronic components / L. A. Kazakovtsev, V. I. Orlov, A. A. Stupina, I. S. Masich // *Vestnik SibGAU*. 2014. № 4 (56). P. 55–61.

© Масич И. С., Федосов В. В., Краева Е. М., 2019

УДК 519.6

## ПРИМЕНЕНИЕ ЖАДНЫХ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

В. И. Орлов<sup>1,2</sup>, Г. Ш. Шкаберина<sup>2</sup>, И. П. Рожнов<sup>2</sup>, В. П. Попов<sup>2</sup>, Л. А. Казаковцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «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. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: levk@bk.ru

*Проведен сравнительный анализ эффективности применения моделей кластеризации  $k$ -средних и  $k$ -медоид для решения задачи автоматической группировки электрорадиоизделий по однородным производственным партиям с использованием трех видов метрик: евклидово расстояние, расстояние Махаланобиса, манхэттенское расстояние.*

*Ключевые слова: расстояние Махаланобиса, Манхэттенское расстояние,  $k$ -means, VNS,  $k$ -медоид.*

## APPLICATION OF GREEDY HEURISTIC ALGORITHMS FOR THE PROBLEM OF DETECTION OF HOMOGENEOUS PRODUCTION BATCHES OF SEMICONDUCTOR DEVICES

V. I. Orlov<sup>1,2</sup>, G. Sh. Shkaberina<sup>2</sup>, I. P. Rozhnov<sup>2</sup>, V. P. Popov<sup>2</sup>, L. A. Kazakovtsev<sup>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, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: levk@bk.ru

*Authors present a comparative efficiency analysis of application of  $k$ -means and  $k$ -medoids clustering models for solving the problem of grouping of semiconductor devices into homogeneous production batches using three types of metrics: Euclidean distance, Mahalanobis distance, Manhattan distance.*

*Keywords: Mahalanobis distance, Manhattan distance,  $k$ -means,  $k$ -VNS,  $k$ -medoid.*

Промышленные партии электронной компонентной базы (ЭКБ) для космической отрасли могут быть неоднородными и быть собранными из нескольких производственных партий пластин. По этой причине результаты тестовых испытаний на выборке ЭКБ распространять на всю поставленную партию деталей необходимо осторожно, как минимум, с убеждением в том, что партия изготовлена из одной партии пластин или, что разброс параметров различных кристалльных партий невелик. Это сопряжено с тем, что относительно незначительные изменения в производственном процессе могут кардинально повлиять на характеристики чувствительности. Следует понимать, из какого количества однородных групп собрана производственная партия электрорадиоизделий (ЭРИ) [1].

**Использование жадных эвристических алгоритмов в задаче автоматической группировки ЭРИ по однородным партиям.** В настоящей работе применены три метода кластерного анализа: наиболее часто использующийся на практике метод  $k$ -средних ( $k$ -means), модифицированный метод  $k$ -VNS [1; 2], алгоритм  $k$ -медоид.

На примере классического метода  $k$ -means и модифицированного метода  $k$ -VNS покажем возможность эффективного использования жадных эвристических алгоритмов в задачах автоматической группировки ЭРИ по однородным партиям.

Для каждого тестируемого алгоритма проведено по 30 запусков для каждой выборки.

Фиксировались все результаты, достигнутые каждым из алгоритмов в каждой попытке, затем среди результатов были определены минимальные и максимальные значения целевой функции по каждой выборке данных, а также среднее значение целевой функции (табл. 1).

Минимальное значение среднеквадратичного отклонения целевой функции показывает, что представленные алгоритмы методов жадных эвристик показывают высокую точность и стабильность решений. При этом классический алгоритм  $k$ -means уступает модифицированному алгоритму  $k$ -VNS, который при большинстве случаев запуска возвращал одинаковое рассчитанное значение целевой функции [2].

Таблица 1

Результаты работы алгоритмов *k*-means и *k*-VNS

Алгоритм	Значение целевой функции			
	Min (Рекорд)	Max	Среднее	Среднеквадратичное отклонение
<i>k</i> -means в режиме мультистарта	581,484	592,637	583,637	7,252
<i>k</i> -VNS	<b>581,484</b>	<b>581,484</b>	<b>581,484</b>	<b>0,0</b>

Таблица 2

Результаты кластеризации (микросхемы 1526ТЛ1 - количество изделий 625 штук)

Алгоритм	Выбор метрики (расстояние)	Количество информативных признаков					
		2	3	4	2	3	4
		кластеризовано верно, шт.			кластеризовано верно, %		
<i>k</i> -means	Евклидово	540	527	515	86,4	84,32	82,4
	Манхэттенское	615	613	606	98,4	98,08	96,96
	Махаланобиса	615	612	604	98,4	97,92	96,64
<i>k</i> -medoid	Евклидово	532	513	506	85,12	82,08	80,96
	Манхэттенское	610	608	607	97,6	97,28	97,12
	Махаланобиса	611	610	608	97,76	97,6	97,28

**Вычислительные эксперименты.** Исходные данные представляют собой определенный набор результатов тестовых воздействий на электрорадиоизделия по контролю вольт-амперных характеристик входных и выходных цепей микросхем. В качестве примера рассматриваются микросхемы 1526ТЛ1 (состоит трех однородных партий – количество изделий 625 штук).

Применены методы *k*-means и *k*-medoid с разным набором информативных признаков для каждой выборки. Для каждого метода произведено 30 тестовых запусков программы с использованием трех видов метрик: Евклидово расстояние, расстояние Махаланобиса, Манхэттенское расстояние [3; 4].

Расчет Евклидовой метрики производится по формуле

$$d_{pq} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2},$$

где  $p, q$  – вектора значений  $i$ -го параметра;  $n$  – количество входных параметров ЭРИ.

Расстояние Махаланобиса определяется по формуле

$$d_M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (x - \mu)},$$

где  $S$  – матрица ковариации выборки  $x$ . Если матрица ковариации является единичной, то расстояние Махаланобиса становится равным Евклидову расстоянию [3]. Если матрица является диагональной, то расстояние Махаланобиса называют нормализованным расстоянием Евклида.

Манхэттенское расстояние вычисляется по формуле

$$d(p, q) = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|,$$

где  $p, q$  – вектора значений  $i$ -го параметра;  $n$  – количество входных параметров ЭРИ.

В случае применения метрики Евклидово расстояние точность кластеризации по *k*-means составляет 82,4–86,4 %, по *k*-medoid – 80,96–85,12 %. Для метрики Манхэттенское расстояние точность по *k*-means составляет 96,96–98,4 %, по *k*-medoid – 97,12–97,6 %. Для метрики расстояние Махаланобиса точность по *k*-means составляет 96,64–98,4 %, по *k*-medoid – 97,28–97,76 % (табл. 2).

Анализ, полученных результатов кластеризации, показал, что с увеличением количества информативных признаков точность кластеризации уменьшается. Также было установлено, что независимо от алгоритмов кластеризации, используя метрику расстояние Махаланобиса точность кластеризации увеличивается, а вот при использовании метрики Евклидово расстояние точность кластеризации уменьшается. Было установлено, что метрика расстояние Махаланобиса повышает точность разделения изделий независимо от алгоритмов кластеризации (*k*-means, *k*-medoid).

### Библиографические ссылки

1. Алгоритм поиска в чередующихся окрестностях для задачи выделения однородных производственных партий электрорадиоизделий / В. И. Орлов, И. П. Рожнов, Л. А. Казаковцев и др. // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2018. Т. 1. С. 315–316.

2. Алгоритм для задачи  $k$ -средних с рандомизированными чередующимися окрестностями / И. П. Рожнов, Л. А. Казаковцев, М. Н. Гудыма и др. // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 3 (73). С. 46–51.

3. Деза Е., Деза М. Глава 19. Расстояния на действительной и цифровой плоскостях. 19.1. Метрики на действительной плоскости // Энциклопедический словарь расстояний. М., 2008. С. 276.

4. Журавлев Ю. И., Рязанов В. В., Сенько О. В. «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения. М. : Фазис, 2006.

#### References

1. Variable neighborhood search algorithm for the problem of detection of homogenous production batches of semiconductor devices] / V. I. Orlov, I. P. Rozhnov, L. A. Kazakovtsev et al. // Reshetnevskie chteniya : materials of the Intern. scientific conf. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Sib. state aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2018. Vol. 1. P. 315–316.

2. Algorithm for the k-means problem with randomized variable neighborhood search / I. P. Rozhnov, L. A. Kazakovtsev, M. N. Gudyma et al. // Control Systems and Information Technology. 2018. Vol. 3 (73). P. 46–51.

3. Desa E., Desa M. Chapter 19. Distances on the real and digital planes. 19.1. Metrics on the real plane // Encyclopedic Dictionary of Distances. Moscow, 2008. P. 276.

4. Zhuravlev Yu. I., Ryazanov V. V., Senko O. V. “Recognition”. Mathematical methods. Software system. Practical applications. Moscow, Fazis, 2006.

© Орлов В. И., Шкаберина Г. Ш.,  
Рожнов И. П., Попов В. П.,  
Казаковцев Л. А., 2019

**ПРИМЕНЕНИЕ ИТЕРАТИВНОГО АЛГОРИТМА МАКСИМИЗАЦИИ  
КРИТЕРИЯ СИЛУЭТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНЫХ ГРУПП  
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ**

В. И. Орлов<sup>1,2</sup>, В. В. Федосов<sup>1,2</sup>, С. М. Голованов<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. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: itcnppm@atomlink.ru

*Предложен итеративный алгоритм максимизации критерия силуэта для решения задачи сортировки электронной компонентной базы (ЭКБ) в однородные группы. Сформулировано понятие однородности партии ЭКБ. Приведены примеры применения разработанного алгоритма для формирования однородных групп интегральных схем при их тестировании для космического применения.*

*Ключевые слова: итеративный алгоритм, критерий силуэта, однородная группа.*

**THE APPLICATION OF AN ITERATIVE ALGORITHM OF MAXIMIZATION  
SILHOUETTE CRITERIA FOR THE FORMATION OF HOMOGENEOUS GROUPS  
OF ELECTRONIC COMPONENTS**

V. I. Orlov<sup>1,2</sup>, V. V. Fedosov<sup>1,2</sup>, S. M. Golovanov<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, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: levk@bk.ru

*Authors propose an iterative algorithm of maximizing the silhouette criterion for solving the problem of sorting the electronic components into homogeneous groups, formulate the concept of homogeneity of a electronic components production batch. The practical examples illustrate the application of the developed algorithm for the formation of homogeneous groups of integrated circuits in the testing for space applications.*

*Keywords: iterative algorithm, silhouette criterion, homogeneous group.*

Современный космический аппарат функционирует в течение 10–15 лет и содержит порядка 100–200 тысяч электронных компонентов. Высокая стоимость и невозможность ремонта в условиях космоса предъявляет к применяемой компонентной базе исключительные требования качества [1]. Совершенство методов тестирования определяет качество ЭКБ космического применения [2]. Одно из наиболее перспективных направлений развития технологий тестирования компонентной базы основано на формировании однородных групп элементов [3].

Для определения однородности используем критерий силуэта (КС) [4]. Пусть партия  $P$  элементов  $Ei$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ) разбита на  $m$  групп  $Gj$  ( $j = \overline{1, m}$ ) с центрами  $Sj$  ( $j = \overline{1, m}$ ), тогда критерий силуэта  $KC(P)$  партии элементов  $P$  определяется по формуле

$KC(P) = \sum_{i=1}^{N_e} KC(i) / N_e$ , где  $KC(i)$  – критерий силуэта элемента  $Ei$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ), определяемый соотношением:

$KC(i) = 1 - a(i) / b(i)$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ). Здесь  $a(i)$  и  $b(i)$  – расстояния (в выбранной метрике) от элемента  $Ei$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ) до центра группы  $Gj$  ( $j = \overline{1, m}$ ), которой принадлежит элемент  $Ei$ , и до центра ближайшей соседней группы  $Gn$  ( $n = \overline{1, m}$ ), соответственно.

Введем понятия однородности: **партия элементов  $P$**  считается **однородной**, если ее нельзя разбить на  $m$  групп  $Gj$  ( $j = \overline{1, m}$ ) так, чтобы выполнялись условия:

$$\begin{cases} KC(P) > KC_{\max}, \\ Rij > R_{\min}(i, j = \overline{1, m}). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $Rij$  – расстояние (в выбранной метрике) между центрами групп  $Gi$  и  $Gj$  ( $i, j = \overline{1, m}$ );  $KC_{\max}$  – максимально допустимое значение критерия силуэта  $KC(P)$ , при котором партия  $P$  элементов  $Ei$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ) может считаться однородной;  $R_{\min}$  – минимальное

расстояние между центрами групп  $G_i$  и  $G_j$  ( $i, j = \overline{1, m}$ ), которое может считаться значимым.

Для определения однородности партии  $P$  элементов  $E_i$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ) предлагается следующий **итеративный алгоритм максимизации критерия силуэта (ИА  $\max KC$ )**:

1) **1-й уровень итерации**: Осуществляется оптимальное в смысле максимизации критерия силуэта  $KC(P)$  деление партии  $P$  элементов  $E_i$  ( $i = \overline{1, N_e}$ ) на группы  $G_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ). Если для партии  $P$  выполняется (1), то партия  $P$  и полученные группы  $G_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) считаются потенциально неоднородными и все группы  $G_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) переходят на следующий уровень итерации. Иначе партия  $P$  считается **однородной** и процесс завершается;

2)  **$k$ -й уровень итерации**: Каждая группа элементов  $G_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ), полученная на  $k$ -1-м уровне итерации и определенная как потенциально неоднородная, в свою очередь, подвергается оптимальному в смысле максимизации критерия силуэта  $KC(G_j)$  делению на подгруппы  $G'j$  ( $j = \overline{1, m'}$ ). Если для подгруппы  $G'j$  ( $j = \overline{1, m'}$ ) условие (1) выполняется, то полученные подгруппы  $G'j$  ( $j = \overline{1, m'}$ ) считаются **потенциально неоднородными**, и все подгруппы  $G'j$  ( $j = \overline{1, m'}$ ) переходят на  $k+1$ -й уровень итерации. Если (1) для группы  $G_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) не выполняется, то группа  $G_j$  получает статус **однородности** и работа с ней завершается;

3) **условие завершения работы алгоритма**: Процесс продолжается до тех пор, пока все группы не получают статус **однородности**.

Проиллюстрируем применение алгоритма на примере сводной партии  $P$  интегральных схем 140УД25АС1ВК, составленной из трех однородных партий: С – 45 шт., Д – 57 шт. и Е – 58 шт., прошедших тестирование по шести тестам. На основе предварительных исследований примем:  $R_{\min} = 1,0$ ,

$KC_{\max} = 0,5$ . Для оптимального в смысле максимизации  $KC$  деления партии элементов на группы используем генетический алгоритм с жадной эвристикой [5]. Для визуализации результатов применим метод многомерного шкалирования (ММШ).

Получим следующие результаты:

1-й уровень итерации: При поиске оптимального в смысле максимума  $KC(P)$  варианта, сводная партия  $P$  разбивается на две группы:  $G_1$  (58 шт.) – элементы партии Е и  $G_2$  (102 шт.) – элементы партий Д и С (рис. 1, а). При этом:  $KC(P) = 0,754$  и  $R(G_1, G_2) = 2,591$ . Согласно (1),  $G_1$  и  $G_2$  являются потенциально неоднородными и переходят на 2-й уровень итерации.

2-й уровень итерации: поиск оптимального в смысле максимума  $KC(G_1)$  деления группы элементов  $G_1$  (рис. 1, б) дал следующий результат:  $G_1$  делится на три подгруппы –  $G_{11}$  (32 шт.),  $G_{12}$  (15 шт.) и  $G_{13}$  (11 шт.).  $KC(G_1) = 0,453$ , и  $0,493 \leq R(G_{1i}, G_{1j}) \leq 0,585$  ( $i, j = 1,3$ ). Поскольку (1) для  $G_1$  (58 шт.) выполняется,  $G_1$  (58 шт.) является однородной. Поиск оптимального по  $KC(G_2)$  деления  $G_2$  дал две подгруппы:  $G_{21}$  (57 шт.) – элементы партии Д и  $G_{22}$  (45 шт.) – элементы партии С (рис. 2, а).  $KC(G_2) = 0,582$ ,  $R(G_{21}, G_{22}) = 1,201$ . Согласно (3) подгруппы  $G_{21}$  и  $G_{22}$  являются потенциально неоднородными и переходят на 3-й уровень.

3-й уровень итерации: Поиск оптимального по  $KC(G_{21})$  деления группы  $G_{21}$  (рис. 2, б) дал три подгруппы –  $G_{211}$  (20 шт.),  $G_{212}$  (20 шт.) и  $G_{213}$  (17 шт.),  $KC(G_{21}) = 0,485$  и  $0,493 \leq R(G_{21i}, G_{21j}) \leq 0,585$  ( $i, j = 1,3$ ). Согласно (1) группа  $G_{21}$  (57 шт.) является однородной. Поиск оптимального по  $KC(G_{22})$  деления группы элементов  $G_{22}$  (рис. 2, в) дал четыре подгруппы –  $G_{221}$  (27 шт.),  $G_{222}$  (5 шт.),  $G_{223}$  (7 шт.) и  $G_{224}$  (6 шт.).  $KC(G_{22}) = 0,494$  и  $0,548 \leq R(G_{22i}, G_{22j}) \leq 0,789$  ( $i, j = 1,4$ ). Согласно (1) группа  $G_{22}$  является однородной.

Полученный результат подтверждает правильность работы алгоритма. Так,  $G_1$  четко соответствует партии Е,  $G_{21}$  – партии Д, и  $G_{22}$  – партии С.

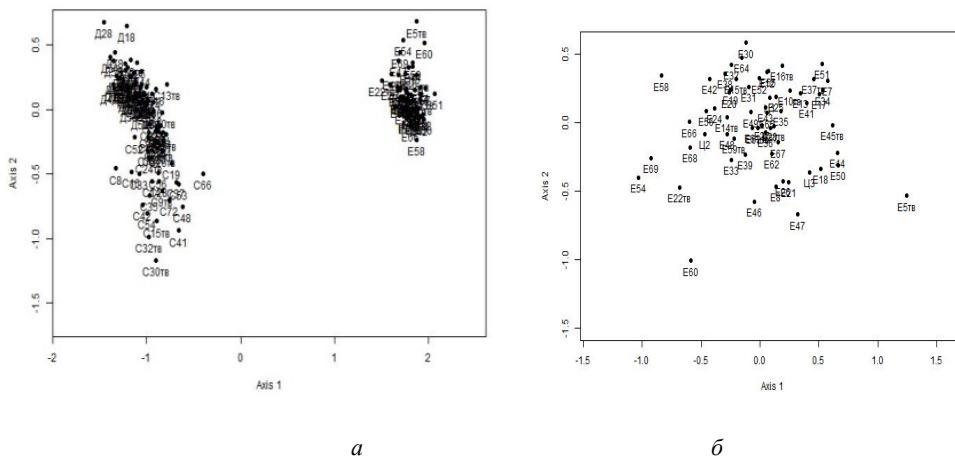


Рис. 1. Результаты отображения на плоскость групп элементов:  $P$  (а) и  $G_1$  (б)



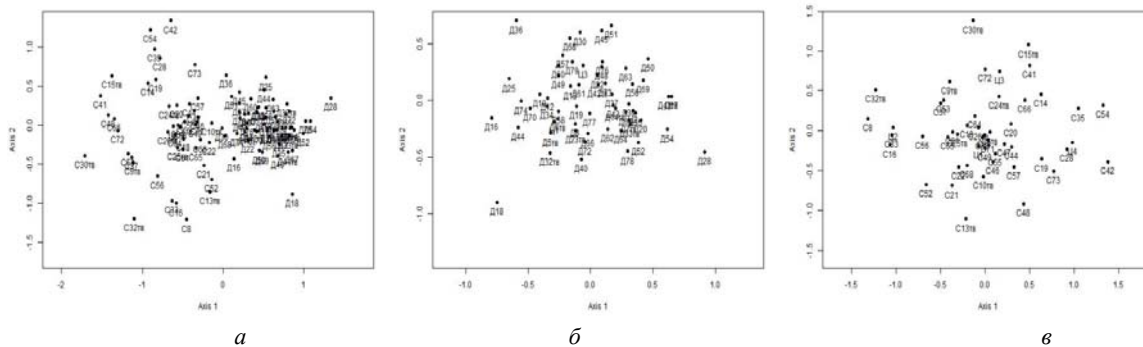


Рис. 2. Результаты отображения на плоскость групп элементов: G2 (а), G21 (б) и G22 (в)

Алгоритмом достигается 100%-я точность деления сводной партии Р на партии С, Д и Е.

#### Библиографические ссылки

1. Орлов В. И., Федосов В. В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2013. Т. 1, № 17. С. 238–241.
2. Федосов В. В. Комплексный подход к электронной компонентной базе как метод обеспечения длительной работоспособности космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. № 5. С. 155–160.
3. Задача классификации электронной компонентной базы / Л. А. Казаковцев, В. И. Орлов, А. А. Ступина, И. С. Масич // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 55–61.
4. Kaufman L., Rousseeuw P. J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. New York : Wiley, 1990. P. 368.
5. Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N., Fedosov V. V. Greedy heuristic algorithm for solving series of EEE components classification problems IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 122 Article ID 012011. 7 P.

#### References

1. Orlov V. I., Fedosov V. V. [Quality of electronic components – space long term performance of space vehicles] // Reshetnevskie chteniya : materials of the Intern. scientific conf. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Sib. state aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2013. Vol. 1, № 17. P. 238–241 (In Russ.).
2. Fedosov V. V. [An integrated approach to the electronic component base as a method of ensuring the long-term performance of spacecraft] // Vestnik SibGAU. 2014. № 5. P. 155–160 (In Russ.).
3. The problem of classification of electronic component base / L. A. Kazakovtsev, V. I. Orlov, A. A. Stupina, I. S. Masich // Vestnik SibGAU. 2014. № 4(56). С. 55–61 (In Russ.).
4. Kaufman L., Rousseeuw P. J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. New York : Wiley, 1990. P. 368.
5. Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N., Fedosov V. V. Greedy heuristic algorithm for solving series of EEE components classification problems IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 122 Article ID 012011. 7 P.

© Орлов В. И., Федосов В. В., Голованов С. М., 2019

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

С. А. Побоженский, Д. В. Ширяев

ФГУП «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации  
Российская Федерация, 111123, г. Москва, Свободный просп., 4

*Рассмотрены задачи, которые решаются с помощью программно-аппаратного комплекса. Описаны основные алгоритмы при решении каждой задачи.*

*Ключевые слова: искусственная нейросеть, свёртка, топологический анализ микросхем.*

## DEEP LEARNING SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM FOR AUTOMATION OF THE ANALYSIS OF INTEGRAL MICROCIRCUITS STRUCTURE

S. A. Pobozhenskii, D. V. Shiryayev

FSUE “18 Central Research Institute” Ministry of Defense  
4, Svobodny Av., Moscow, 111123, Russian Federation

*Considered major routines for automation using hardware and software system. Described most important algorithms for solving those tasks.*

*Keywords: artificial neural network, convolution, topological microcircuits analysis.*

При выполнении исследований технологии изготовления и структуры интегральных микросхем (ИМС) проводится топологический анализ структур этих ИМС. Для увеличения скорости, качества, точности и достоверности топологического анализа мы разработали программно-аппаратный комплекс на основе гибридных интеллектуальных систем.

Задачи, которые уже решены с помощью данного комплекса:

– идентификация блоков памяти на кристаллах ИМС, определение их типа и объема;

– автоматизация процесса верификации микросхем, спроектированных в Российских дизайн-центрах, но произведенных за рубежом;

Задачи, которые решаются на данный момент:

– автоматизация распознавания топологических элементов микросхем низкой степени интеграции для дальнейшего получения схем электрических принципиальных и их моделирования;

– автоматизация распознавания топологических элементов микросхем высокой степени интеграции (микроконтроллеры, ЦАП, АЦП).

Кратко опишем принцип работы сверточной нейросети, которую мы используем. На вход подается изображение (в нашем случае это изображение кристалла ИМС, содержащего память) и пропускается через серию нелинейных сверточных и полносвязных слоев. Нейросеть самостоятельно вырабатывает иерархию абстрактных признаков (так называемые карты признаков), фильтруя маловажные детали и выделяя существенные, по которым и производит классификацию поданного на вход изображения. Каскад обученных нейросетей, в конечном итоге, при получении на входе изображения, на выходе показы-

вает, где и какого типа находится память на кристалле и каков ее объем. Таким образом, используя программно-аппаратный комплекс, получается идентифицировать блоки памяти и определять их назначение с высокой точностью и в автоматическом режиме.

Для решения задачи верификации так же используется сверточная нейросеть. Отдельные слои GDS файла конвертируются в растровые изображения и последовательно сравниваются с изображением топологии кристалла, используя различные методы локального вычитания, сравнения и корреляции. Сверточная нейросеть анализирует результирующее изображение и обучается отличать существенные признаки от несущественных на основе имеющейся базы изображений. После обучения, комплекс способен выполнять такую задачу в автоматическом режиме, оператору остается только проверить результат работы и при необходимости дообучить нейросеть. Такой подход позволяет существенно сократить время верификации топологических слоев кристаллов микросхем с нескольких месяцев до нескольких часов.

Следующей задачей является распознавание топологических элементов микросхем низкой степени интеграции.

Решение этой задачи разбивается на три этапа:

На первом этапе размечаются области на основе набора пространственных фильтров (сверточные фильтры, фильтры Габора).

На втором этапе используется набор быстрых нейросетей, обученных распознавать топологические примитивы.

На последнем, третьем этапе сверточная нейросеть производит окончательную классификацию и разметку.

В качестве альтернативы возможна единовременная классификация элементов изображения и использованием сверточной нейросети с архитектурой единовременного просмотра (YOLO)

В дальнейшем, постепенно переходя от простого к сложному, перейдем к распознаванию топологических элементов в микросхемах высокой степени интеграции, что позволит говорить о недостижимых в данный момент скорости и точности анализа структур ИМС.

#### References

1. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J.: Deep residual learning for image recognition. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 770–778.
2. Mahendran A., Vedaldi A. Understanding deep image representations by inverting them. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 5188–5196.
3. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556. 2014.
4. Orchard J., Ebrahimi M., Wong A. Efficient nonlocal-means denoising using the SVD // Proc. IEEE International Conference on Image Processing. 2008. P. 1732–1735.
5. Karnati V., Uliyar M., Dey S. Fast non-local algorithm for image denoising // Proc. IEEE International Conference on Image Processing. 2009. P. 3873–3876.

© Побоженский С. А., Ширяев Д. В., 2019

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО ПОДХОДА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ С ОСОБЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ КАЧЕСТВА

И. П. Рожнов<sup>1</sup>, Л. А. Казаковцев<sup>1</sup>, В. И. Орлов<sup>1,2</sup>, Е. В. Лапунова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>ОАО «Испытательный технический центр – НПО ПМ»  
Российская Федерация, 662970, г. Железногорск, ул. Молодежная, 20  
E-mail: ris2005@mail.ru

*Изложен подход к разработке алгоритмов автоматической группировки, основанных на параметрических оптимизационных моделях и методе VNS для формирования электронной компонентной базы космического применения, даны сравнительные результаты.*

*Ключевые слова:* GH-VNS, VNS, кластерный анализ, автоматическая группировка.

## APPLICATION OF A NEW APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF AUTOMATIC GROUPING ALGORITHMS FOR THE FORMING OF AN ELECTRONIC COMPONENT BASE WITH SPECIAL QUALITY REQUIREMENTS

I. P. Rozhnov<sup>1</sup>, L. A. Kazakovtsev<sup>1</sup>, V. I. Orlov<sup>1,2</sup>, E. V. Lapunova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC “Testing Technical Center – NPO PM”  
20, Molodezhnaya Str., Zheleznogorsk, 662970, Russian Federation  
E-mail: ris2005@mail.ru

*Authors describe an approach to the development of clustering algorithms based on parametric optimization models and the VNS method for forming the electronic component base for space applications and present comparative results.*

*Keywords:* GH-VNS, VNS, cluster analysis, automatic grouping.

Анализ существующих проблем применения методов автоматической группировки объектов, к которым предъявляются высокие требования по точности и стабильности результата, показывает дефицит алгоритмов, способных выдавать за фиксированное время результаты, которые было бы трудно улучшить известными методами, и которые бы обеспечивали стабильность получаемых результатов [1; 2].

Наиболее популярным из методов кластерного анализа является метод  $k$ -средних ( $k$ -means). Одноименный алгоритм последовательно улучшает известное решение, позволяя найти локальный минимум. Алгоритм имеет ограничения – в начале решения необходимо задать число групп  $k$ , на которые разбиваются объекты, а результат сильно зависит от начального решения [1].

Алгоритм для задачи  $k$ -медоид – Partitioning Around Medoids (РАМ) похож на алгоритм  $k$ -средних: работа обоих основана на попытках минимизировать ошибку, но РАМ работает с медоидами – объектами, являющимися частью исходного множества и представляющими группу, в которую они включены, а  $k$ -means работает с центроидами – искусственно созданными объектами, представляющими кластер [2]. В число популярных методов входит и алгоритм Expectation Maximization (ЕМ-алгоритм – максимизация математического ожидания). Основная идея алго-

ритма состоит в искусственном введении вспомогательного вектора скрытых переменных, что сводит сложную оптимизационную задачу к двум шагам [3]. Классификационный ЕМ-алгоритм (Classification Expectation Maximization – СЕМ) работает по принципу четкой классификации данных выборки [3].

В дальнейшем каждую из процедур:  $k$ -средних,  $k$ -медоид и СЕМ обозначим как двухшаговый алгоритм локального поиска. Тем более что сами процедуры  $k$ -средних и  $k$ -медоид являются, по сути, алгоритмами поиска с чередующимися окрестностями [4]. Далее при решении задач  $k$ -средних в качестве двухшагового алгоритма локального поиска будет реализован одноименным алгоритмом, соответственно для  $k$ -медоид – алгоритмом РАМ и максимизации функции правдоподобия – СЕМ-алгоритмом.

В [1–3] были рассмотрены комбинации алгоритмов метода жадных эвристик с чередующимися окрестностями [4] для задач  $k$ -средних,  $k$ -медоид и алгоритма СЕМ.

Повысить точность методов автоматической группировки позволяет новый подход к разработке алгоритмов автоматической группировки, основанных на параметрических оптимизационных моделях, с комбинированным применением алгоритмов поиска с чередующимися рандомизированными окрестностями и жадных агломеративных эвристических процедур.

## Результаты вычислительных экспериментов, 30 попыток

Алгоритм	Значение целевой функции			
	Min	Max	Среднее	Среднеквадратичное отклонение
Набор данных BIRCH3 (100000 векторов данных, каждый размерностью 2) 100 кластеров, 6 часов				
<i>k</i> -means	7,92474E+13	8,87404E+13	8,31599E+13	3,088140E+12
<i>j</i> -means	3,76222E+13	3,7965E+13	3,77715E+13	0,116211E+12
<i>k</i> -GH-VNS	<b>3,72525E+13</b>	3,74572E+13	<b>3,73745E+13</b>	<b>0,074315E+12</b>
Партия изделий 1526TL1 (1234 векторов данных, каждый размерностью 157) 10 кластеров, 1 минута				
<i>k</i> -means	43 842,10	43 844,66	43 843,38	0,8346
<i>j</i> -means	<b>43 841,97</b>	43 843,51	43 842,59	0,4487
<i>k</i> -GH-VNS	<b>43 841,97</b>	43 842,10	<b>43 841,99</b>	<b>0,0424</b>
GAGH	<b>43 841,98</b>	43 844,18	43 842,6	0,6762
GA classical	43 842,10	43 842,88	43 842,44	0,2349
Deterministic GH (IBC)	45 021,21	45 021,21	45 021,21	0,0000

**Алгоритм** GH-VNS (Greedy Heuristic in the Variable Neighborhood Search)

1: Получить решение  $S$ , запустив двухшаговый алгоритм локального поиска из случайным образом сгенерированного начального решения.

2:  $O = O_{\text{start}}$  (номер окрестности поиска).

3:  $i = 0, j = 0$  (количество безрезультатных итераций в окрестности и в алгоритме).

**пока**  $j < j_{\text{max}}$

**пока**  $i < i_{\text{max}}$

4: **если** не выполняются условия ОСТАНОВА (превышение лимита времени), **то** получить решение  $S'$ , запустив двухшаговый алгоритм локального поиска из случайного начального решения.

**повторять**

5: В зависимости от значения  $O$  (возможны значения 1, 2 или 3), запустить Алгоритм Жадная процедура 1 или 2 или 3 (подробно описаны в [1, 2]) соответственно с начальными решениями  $S$  и  $S'$ . Так, окрестность определяется способом включения центров кластеров из второго решения и параметром окрестности – вторым известным решением.

**если** новое решение лучше, чем  $S$ , **то** записать новый результат в  $S$ ,  $i = 0, j = 0$ .

**иначе** выйти из цикла.

**конец цикла**

6:  $i = i + 1$ .

**конец цикла**

7:  $i = 0, j = j + 1, O = O + 1$ , **если**  $O > 3$ , **то**  $O = 1$ .

**конец цикла**

В данном алгоритме  $i_{\text{max}}$  – число безрезультатных поисков в окрестности, а  $j_{\text{max}}$  – число безрезультатных переключений окрестностей. Значения этих двух параметров важны при расчётах. Мы использовали значения:  $i_{\text{max}} = 2k$ ,  $j_{\text{max}} = 2$ . Важным является способ получения второго решения  $S'$  на Шаге 4. По умолчанию второе решение содержит число центров, равное числу центров в решении  $S$ .

Результаты вычислительных экспериментов [1–3] показали (см. таблицу), что новые алгоритмы метода жадных эвристик для задач автоматической группировки с повышенными требованиями к точности результата (по значению целевой функции), с применением алгоритмов поиска с чередующимися рандомизированными окрестностями (GH-VNS) имеют более

стабильные (меньшее среднеквадратичное отклонение целевой функции) и более точные (меньшее среднее значение целевой функции) результаты, и следовательно, лучшие показатели в сравнении с классическими алгоритмами (*k*-средних, *j*-means, PAM и CEM).

## Библиографические ссылки

1. Алгоритм для задачи *k*-средних с рандомизированными чередующимися окрестностями / И. П. Рожнов, Л. А. Казаковцев, М. Н. Гудыма и др. // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 3 (73). С. 46–51.

2. Рожнов И. П. Алгоритмы с чередованием жадных эвристических процедур для дискретных задач кластеризации // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 1 (75). С. 49–55.

3. Rozhnov I., Kazakovtsev L., Bezhitskaya E. and Bezhitskiy S. Improved Classification EM algorithm for the Problem of Separating Semiconductor Device Production Batches // IOP Conf. Series: MIP: Engineering. 2019. Vol. 537.

4. Hansen P., Mladenovic N. Variable neighborhood search: principles and applications // Eur. J. Oper. Res. 2001. Vol. 130. P. 449–467.

## References

1. Algorithm for the *k*-means problem with randomized variable neighborhood search / I. P. Rozhnov, L. A. Kazakovtsev, M. N., Gudyma V. L. Kazakovtsev // Control Systems and Information Technology. 2018. Vol. 3 (73). P. 46–51.

2. Rozhnov I. P. [Algorithms with variable greedy heuristic procedures for discrete clustering problems] // Control Systems and Information Technology. 2019. Vol. 1 (75). P. 49–55.

3. Rozhnov I., Kazakovtsev L., Bezhitskaya E. and Bezhitskiy S. Improved Classification EM algorithm for the Problem of Separating Semiconductor Device Production Batches // IOP Conf. Series: MIP: Engineering. 2019. Vol. 537.

4. Hansen P., Mladenovic N. [Variable neighborhood search: principles and applications] // Eur. J. Oper. Res. 2001. Vol. 130. P. 449–467.

© Рожнов И. П., Казаковцев Л. А., Орлов В. И., Лапунова Е. В., 2019

## КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ С ПОМОЩЬЮ СВОЙСТВ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕКЛОНИРУЕМОСТИ

В. Н. Старцев, А. В. Семенов\*

ФГУП «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации  
Российская Федерация, 111123, г. Москва, Свободный просп., 4  
\*E-mail: antony.se@yandex.ru

*Настоящая работа посвящена демонстрации результатов разработки комплекса контроля СОЗУ с помощью физически неклонированных функций (ФНФ). Предлагаемый комплекс позволяет решать задачи идентификации, контроля однородности и сравнительного контроля микросхем СОЗУ, используемых в космических аппаратах на основе физических моделей ячеек, связывающих качественные характеристики технологического процесса и функциональные свойства оперативной памяти.*

*Ключевые слова: статическое оперативное запоминающее устройство, физически неклонированные функции, контроль однородности.*

## SYSTEM FOR CONTROL OF REABILITY STATIC RANDOM ACCES MEMORY BASED ON PROPERTYS OF PHYSICAL UNCLONABLE FUNCTION MONITORING OF STATIC RAM, USING PROPERTIES OF PHYSICALLY UNCLONEABLE FUNCTIONS

V. N. Starcev, A. V. Semenov\*

FSUE "18 Central Research Institute" Ministry of Defense  
4, Svobodny Av., Moscow, 111123, Russian Federation  
\*E-mail: antony.se@yandex.ru

*The present work is devoted to demonstrating the results of development of complex control SRAM using physically uncloneable functions (PUF). The complex allows to solve problems of identification, uniformity control and comparative control of the SRAM chips used in space vehicles on the basis of physical models of cells, linking the qualitative characteristics of the technological process and functional properties of memory*

*Keywords: static operational storage device, physically uncloneable function, uniformity control.*

**Введение.** Целью настоящей работы является демонстрация результатов разработки комплекса контроля СОЗУ с помощью свойств физически неклонированных функций (ФНФ). Комплекс позволяет решать следующие задачи.

1. Задачу идентификации кристаллов микросхем – получить уникальный идентификатор микросхемы СОЗУ, воспроизводимый на протяжении её жизненного цикла.

2. Задачу сравнительного анализа возраста микросхем в целях установления однородности партии микросхем СОЗУ – за минимальное количество испытаний выявить микросхемы, изготовленные в модифицированном технологическом процессе.

Процесс получения исходных данных для решения этих задач состоит в следующем:

– формирование представительной выборки устройств из партии (с учетом требований к значениям риска потребителя при выборочном контроле);

– считывание, по крайней мере, 1000 значений СОЗУ в нормальных условиях ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; нормальное значение напряжения  $V_{ih}$  по справочному листу) – для получения ФНФ после каждого считывания нужно отключать питание, считывая значения ячеек после повторного включения с одинаковой временной задержкой.

Для оценки свойств полученных ФНФ предлагаются к использованию следующие показатели:

– вес Хэмминга (HW) – число единиц в двоичном векторе  $x$  длины  $n$ ;

– расстояние Хэмминга (HD) – расстояние между двоичными векторами  $x$  и  $y$  длины  $n$ , определяемое через количество позиций векторов с различающимися значениями.

При этом для простоты целесообразно использовать вес и расстояние, деленные на длину двоичной последовательности (fractional HW (FHW) и fractional HD (FHD)).

Известно, что при первичной подаче питания двухинверторная ячейка СОЗУ оказывается в одном из трех состояний (0,1, неопределенное состояние). Неопределенное состояние означает, что математическое ожидание значения такой ячейки при достаточном (в статистическом смысле) количестве включений будет находиться ближе к «0,5» чем к «0» или «1». Тогда, с учетом зависимости первоначального значения в ячейке от геометрии транзистора (толщины оксида, длины и ширины канала, концентрации легирующей примеси) при одинаковых температуре и напряжении, можно выдвинуть гипотезу о близости поведения ячеек памяти, изготовленных в едином технологическом процессе.

Следовательно, для микросхем с СОЗУ анализ массивов данных о первичной инициализации ячеек можно использовать для контроля однородности по FHD.

Использование, по крайней мере, одного дополнительного режима получения исходных данных (например, получение при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) позволяет выявлять не только неоднородные микросхемы СОЗУ в партии, но и микросхемы, бывшие в употреблении. С учетом влияния стандартных деградиационных процессов (например, нестабильности напряжения обратного смещения) на качество свойств ФНФ СОЗУ.

Таким образом, метод контроля СОЗУ на основе ФНФ состоит из следующих этапов:

1. Получение первоначального массива данных.
2. Оценка свойств ФНФ: FHD и FHW для определения доли нестабильных ячеек.
3. Получение массива данных для пониженной (повышенной) температуры (напряжения).
4. Учет сильных расхождений свойств ФНФ внутри выборки микросхем из одной партии.

Для построения аппаратно-программного комплекса, реализующего контроль СОЗУ использован набор универсального оборудования фирмы National Instruments на базе шасси NI PXI-1073 с модулями программируемого источника питания NIPXI-4110 и реконфигурированной платы ввода-вывода NI PXI-7841R, совместной работой которых управляет разработанный нами виртуальный прибор LabView. Возможности комплекса были апробированы при контроле СОЗУ фирмы Surgus из двух партий, выпущенных с двухгодичным интервалом времени (2013 и 2015 годах). Согласно этапам предложенного метода в автоматическом режиме: у каждой микросхемы 1000 раз считан образ памяти, чтение повторялось через равные промежутки времени с отключением напряжения питания; для каждой микросхемы рассчитаны FHD и FHW, для сравнительного анализа также рассчитаны FHD микросхем между собой, что позволило кластеризовать микросхемы в однородные партии, основываясь на гипотезе компактности и оценить результаты такого разделения, опираясь на аппаратную информацию, как это сделано в работе [8].

Таким образом, использование ФНФ СОЗУ для контроля микросхем с СОЗУ позволяет решить задачу контроля однородности партии микросхем СОЗУ и выявить бывшие в употреблении микросхемы внутри неоднородной партии в случае значительных различий свойств ФНФ для некоторых микросхем.

#### Библиографические ссылки

1. Estimating the secrecy-rate of physical unclonable functions with the context-tree weighting method / T. Ignatenko et al. // *Information Theory, 2006 IEEE International Symposium on*. 2006. С. 499–503.
2. Van der Leest V., Tuyls P. Anti-counterfeiting with hardware intrinsic security // *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2013. P. 1137–1142.
3. Böhm C., Hofer M., Pribyl W. A microcontroller sram-puf // *Network and System Security (NSS)*. 5th International Conference on. IEEE, 2011. P. 269–273.

5th International Conference on. IEEE, 2011. P. 269–273.

4. Cloning physically unclonable functions / C. Helfmeier et al. // *Hardware-Oriented Security and Trust (HOST)*, 2013 IEEE International Symposium on. 2013. С. 1–6.

5. Schrijen G. J., van der Leest V. Comparative analysis of SRAM memories used as PUF primitives // *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe*. EDA Consortium, 2012. С. 1319–1324.

6. Modeling SRAM start-up behavior for physical unclonable functions / M. Cortez et al. // *Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT)*, 2012 IEEE International Symposium on. IEEE. 2012. P. 1–6.

7. PUFs: Myth, fact or busted? A security evaluation of physically unclonable functions (PUFs) cast in silicon / S. Katzenbeisser et al. // *Cryptographic Hardware and Embedded Systems—CHES*. 2012. P. 283–301.

8. Старцев В. Н., Степанов Е. Н. Опытное исследование математической кластеризации микросхем по их s-параметрам // *Научно-технический сборник. В/ч 11135, тематический вып. 4(217)*. 2016. С. 61–70.

#### References

1. Estimating the secrecy-rate of physical unclonable functions with the context-tree weighting method / T. Ignatenko et al. // *Information Theory, 2006 IEEE International Symposium on*. 2006. С. 499–503.

2. Van der Leest V., Tuyls P. Anti-counterfeiting with hardware intrinsic security // *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2013. P. 1137–1142.

3. Böhm C., Hofer M., Pribyl W. A microcontroller sram-puf // *Network and System Security (NSS)*. 5th International Conference on. IEEE, 2011. P. 269–273.

4. Cloning physically unclonable functions / C. Helfmeier et al. // *Hardware-Oriented Security and Trust (HOST)*, 2013 IEEE International Symposium on. 2013. С. 1–6.

5. Schrijen G. J., van der Leest V. Comparative analysis of SRAM memories used as PUF primitives // *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe*. EDA Consortium, 2012. С. 1319–1324.

6. Modeling SRAM start-up behavior for physical unclonable functions / M. Cortez et al. // *Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT)*, 2012 IEEE International Symposium on. IEEE. 2012. P. 1–6.

7. PUFs: Myth, fact or busted? A security evaluation of physically unclonable functions (PUFs) cast in silicon / S. Katzenbeisser et al. // *Cryptographic Hardware and Embedded Systems—CHES*. 2012. P. 283–301.

8. Startsev V. N., Stepanov E. N. An experimental study of the mathematical clustering of microcircuits by their s-parameters // *Scientific and Technical Collection. Military unit 11135, thematic issue. 4 (217)*. 2016. P. 61–70.

© Старцев В. Н., Семенов А. В., 2019

## РАСЧЕТ СИЛЫ ВОЛОЧЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ ВОЛНОВОДОВ

В. И. Трифанов, Е. А. Карелина, И. В. Трифанов

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

*Предложены приближенные формулы для расчета сил растяжения инструмента-дорна и волочения трубчатой заготовки при формообразовании труб прямоугольного сечения.*

*Ключевые слова: инструмент-дорн, трубчатая заготовка, усилие деформации.*

## CALCULATION OF DRAWING FORCE IN THE MANUFACTURE OF WAVEGUIDE PIPES

V. I. Trifanov, E. A. Karelina, I. V. Trifanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*There are approximate formulas for calculating the tensile forces of the mandrel tool and the drawing of the tubular billet in the formation of rectangular tubes.*

*Keywords: tool-mandrel, a tubular workpiece, the force of deformation.*

При изготовлении труб волноводов прямоугольного сечения волочением трубной заготовки за несколько переходов необходимо знать силы волочения [1; 2]  $F_B$  и усиления растягивания в хвостовике инструмента-дорна  $N_D$ . При этом должно выполняться условие [2]

$$N_D \leq F_B \text{ или } N_D = k \cdot F_B, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий соотношение силы протягивания трубчатой заготовки волновода и силу растяжения хвостовика инструмента-дорна.

Сила растяжения, действующая на инструмент-дорн, зависит от суммы касательных напряжений по его периметру.

Усилие в инструменте-дорне может быть найдено по формуле

$$N_D = -l \cdot K_{\text{трд}} \cdot p \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (\sigma_y^i + \sigma^{i+1}) / 2, \quad (2)$$

где  $\sigma_y$  – компонента тензора напряжений по оси  $y$ ;  $p$  – периметр прямоугольной поверхности инструмента-дорна;  $K_{\text{трд}}$  – коэффициент трения между инструментом-дорном и трубчатой заготовкой волновода;  $l$  – длина очага деформации трубчатой заготовки;  $i$  – число деформирующего протягивания.

Сила волочения, действующая на трубчатую заготовку должна быть больше  $N_D$  в связи с тем, что она преодолевает усилия, связанные с угловыми деформациями при изменении формы трубчатой заготовки с круглой на прямоугольную при каждой протяжке, а также преодолевает силы внешнего трения между четырьмя роликами фильеры и деформируемой труб-

чатой заготовкой с учетом известной формулы для расчета силы волочения в роликовой фильере [1].  $F_B$  можно представить в виде выражения:

$$F_B = N_D + 2k_p \cdot \sigma_T \ln \lambda \cdot S_1, \quad (3)$$

где  $\ln \lambda$  – показатель вытяжки;  $S_1$  – площадь поперечного сечения стенки трубчатой заготовки на выходе из роликовой фильеры;  $\sigma_T$  – средний предел текучести металла, который усредняют по начальному и конечному значению:  $\sigma_T = 0,5(\sigma_{T0} + \sigma_{T1})$ , коэффициент  $k_p = 1,3 \div 1,4$  принятый для учета работы сил контактного трения и потерь, связанных с вращением

роликов в подшипниках [1];  $\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{S_0}{S_1}$ , где  $l_0$ ,  $S_0$  – начальная длина и площадь поперечного сечения трубчатой заготовки,  $l_1$ ,  $S_1$  – длина и площадь поперечного сечения трубчатой заготовки после волочения.

**Вывод.** Предложены приближенные формулы для расчета сил растяжения инструмента-дорна и волочения трубчатой заготовки с учетом параметров технологического процесса механических свойств обрабатываемого материала.

## Библиографические ссылки

1. Рудской А. И., Лунев В. А., Шаболдо О. П. Волочение : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 126 с.

2. Трифанов И. В., Трифанов В. И., Евтушенко В. В. Технологическое обеспечение качества при изготовлении линий передачи энергии антенно-фидерных устройств / М-во сельского хозяйства Рос-



сийской Федерации. Красноярск : Изд-во Красноярского гос. аграрного ун-та, 2006. 241 с.

**References**

1. Rudskoy A. I. *Volochenie*: [Drawing]. Spb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 126 p.

2. Trifanov I. V. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva pri izgotovlenii liniy peredachi energii*

*antenna-fidernykh ustroystv* [Technological quality assurance in the manufacture of power transmission lines of antenna-feeder devices]. Krasnoyarsk : Izd-vo Krasnoyarskogo gos. agrarnogo un-ta, 2006. 241 p.

© Трифанов В. И., Карелина Е. А.,  
Трифанов И. В., 2019

## СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ

В. И. Трифанов, О. А. Суханова, И. В. Трифанов

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

*Представлен анализ способов защиты КА от космической радиации. Предложены наиболее перспективные системы защиты.*

*Ключевые слова: канал радиационная защита, магнитное и электростатическое поле, рекуператор энергии заряженных частиц.*

## THE WAYS TO PROTECT SPACECRAFT FROM SPACE RADIATION

V. I. Trifanov, O. A. Sukhanova, I. V. Trifanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*The analysis of methods of SC protection from space radiation is presented. The most promising protection systems are proposed.*

*Keywords: radiation protection channel, magnetic and electrostatic field, charged particle energy recuperator.*

Известно, что без радиационной защиты межпланетные пилотируемые полеты невозможны. Проблема космической радиации стоит достаточно остро и для пилотируемых полетов к Луне, которые планируются в рамках российской лунной программы [1]. Разработка и испытание системы радиационной защиты КА являются актуальными и требуют создания способов и средств радиационной защиты от заряженных частиц холодной плазмы.

Установлено, что наибольший вклад в суммарную дозу радиации при солнечных вспышках вносят протоны с энергией 20...500 МэВ [1]. Относительно небольшие солнечные вспышки дают максимальную плотность потока протонов с энергией 100 МэВ не более  $10^2 \dots 10^3$  частиц/см<sup>2</sup>·с, что сравнимо с плотностью потока протонов во внутреннем радиационном поясе Земли [2]. Электронная доля всегда больше, чем протонная, в 10–1000 раз, а энергия электронов в 100 раз меньше.

В отличие от солнечных космических лучей, галактические лучи (ГЛ), состоящие из протонов и заряженных ядер более тяжелых элементов, имеют поток частиц на пять-шесть порядков меньше [1], при этом энергия ГЛ составляет более 1 ГэВ. Галактическое излучение изотропно, оно действует постепенно, «убивая медленно, но верно» [1]. Галактическое излучение представляет глобальную опасность при длительных межпланетных перелетах, так как защищаться от него намного сложнее.

Для радиационной безопасности может применяться пассивная защита, которая отличается высокими габаритно-массовыми характеристиками [3].

В связи с отмеченными недостатками предложено множество систем, в которых магнитное поле способно отклонять заряженные частицы [3] за счет силы Лоренца.

Недостатком применения систем с магнитным полем является их большая масса, необходимость защиты жилого отсека КА от проникающего магнитного поля [1], а также высокие затраты электроэнергии на создание магнитной индукции 5–10 Тл.

Перспективной является электростатическая защита, которая может позволить отразить заряженные протоны и ядра электрическим полем [4]. Однако при ее проектировании не решены концептуальные проблемы зарядки оболочки КА до положительного потенциала 2 ГэВ [1], на поддержание которого постоянно необходимо тратить огромную энергию (~1 ГВт).

Предложено использовать способ многослойных оболочек во вложенных сферах, внутренние оболочки которых могут заряжаться до требуемого потенциала [5] при помощи специальных магнитокумулятивных генераторов многократного действия высокого напряжения. Могут применяться для зарядки до 20 МВ также генераторы типа Ван-дер-Граафа [1].

Внешняя оболочка вложенной сферы может заряжаться за счет энергии заряженных частиц космической среды, например, при помощи генераторов тока на потоке плазмы с пролетными рекуператорами энергии, которые будут отбирать часть энергии у высокоэнергетических заряженных частиц, а затем направлять их на внешнюю оболочку вложенной сферы [6], заряжая ее с требуемой энергией. При этом поло-

жительный заряд на внутренней сфере создает защитное электрическое поле, а отрицательный на внешней компенсирует его до нуля вне защитного экрана. Электрическое поле не будет проникать во внутрь защищаемого пространства в силу эффекта «клетки Фарадея», что повысит эффективность защиты экипажа в КА.

Внутренняя поверхность внешней сферы и внешняя поверхность внутренней сферы должны быть покрыты диэлектриком, способным выдерживать диэлектрический пробой. Для этого может использоваться плавленный кварц, диалектическая прочность которого равна 600 кВ/мм. Напряженность электрического поля между внутренней и внешней сферами может регулироваться в определенном диапазоне приборами с контроллерами ПЛК-150. Лишний заряд при этом с защитных сфер может сбрасываться на мощные электростатические батареи. Накопленную энергию электростатическими батареями предполагается использовать для питания электрических систем КА [5].

Для радиационной защиты КА могут также применяться комбинированные устройства, в состав которых будут входить электростатическая и магнитная система, а также система рекуператоров энергии заряженных частиц. Например, при защите от проникновения на защищаемый КА слабо энергетических заряженных частиц, излучаемых солнцем, путем рекуперации их энергии, целесообразно создание силового магнитного поля в виде открытой магнитной ловушки. Это позволяет повысить стабильность источника плазмы с требуемыми параметрами для эффективной работы рекуператоров энергии заряженных частиц [7], которые целесообразно устанавливать у полюсов магнитного поля N и S открытой магнитной ловушки.

Магнитная ловушка может быть создана на основе электромагнитов или с использованием постоянных магнитов.

**Выводы.** Проведен анализ существующих способов защиты КА от космической радиации. Предложен перспективный комплексный способ радиационной защиты на основе создания магнитных и электростатических полей совместно с системой рекуператоров энергии заряженных частиц холодной плазмы.

#### Библиографические ссылки

1. Ребеко А. Г. Защита людей и космических аппаратов в космосе. Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. Вып. 5. С. 1–22.

2. Мирошниченко Л. И. Физика космоса [Электронный ресурс]. URL: <http://www.astronet.ru/db/author/11352> (дата обращения: 01.09.2019).

3. Паркер Ю. Как защитить космических путешественников. В мире науки. 2006. № 6. С. 14–20.

4. Уманский С. П. Пилотируемые полеты к Марсу. Земля и Вселенная. 1994. № 6. С. 22–31.

5. Заявка на патент № 2019127978 от 09.07.2019. Способ защиты от заряженных частиц космической радиации / Трифанов И. В., Мелкозеров М. Г., Трифанов В. И. 2019.

6. Пат. 2597205 Российская Федерация, МПК H01J 25/68 (2006.01). Генератор электрического тока на потоке плазмы / Трифанов И. В., Казьмин Б. Н., Трифанов В. И., Оборина Л. И. № 2015115048/07 ; заявл. 21.04.2015 ; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. 13 с.

7. Пат. 2617689 Российская Федерация МПК B01D 69/00 (2006.01). 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, 8 с.

#### References

1. Rebeko A. G. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering journal: science and innovation*. 2016. № 5. P. 1–22.

2. Miroshnichenko L. I. *Fizika kosmosa* [Outer space physics] [Electronic resource]. URL: <http://www.astronet.ru/db/author/11352> (access: 01.09.2019).

3. Parker Yu. *V mire nauki – In the World of Science*. 2006. № 6. P. 14–20.

4. Umanskiy S.P. *Zemlya i Vselennaya – The Earth and The Universe*. 1994. № 6. P. 22–31.

5. Trifanov I. V., Melkozzerov M. G., Trifanov V. I. *Sposob zashchity ot zaryazhennykh chastits kosmicheskoy radiatsii* [Method of protection from charged particles of cosmic radiation]. Patent application no. 2019127978. 09.07.2019.

6. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Oborina L. I. Trifanov V. I. *Generator elektricheskogo toka na potoke plazmy* [A power generator to the plasma flow]. Patent RF, no. 2597205, 2016.

7. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Trifanov V. I., Oborina L. I. *Rekuperator energii polozhitel'no zaryazhennykh ionov* [The heat exchanger energy positive ions] Patent RF, no 2617689, 2017.

© Трифанов В. И., Суханова О. А., Трифанов И. В., 2019



**Секция**

**«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

**ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНЫХ ОЦЕНОК ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

М. Е. Баранов\*, А. В. Кравченко, Р. В. Лапко

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

*Рассматривается порядок обеспечения требуемого качества решения задач оценки летно-технических характеристик летательных аппаратов, в условиях ограниченных возможностей экспериментально-испытательной базы полигонов и космодромов.*

*Ключевые слова: летательный аппарат, летно-технические характеристики, математическая модель.*

**THE PROBLEM OF OBTAINING RELIABLE ESTIMATES OF PERFORMANCE  
IN CONDUCTING TESTS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY  
AND THEIR SOLUTIONS**

M. E. Baranov\*, A. V. Kravchenko, R. V. Lapko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: me\_baranov@mail.ru

*Describes how to ensure the required quality of decision of tasks of assessing the flight characteristics of aircraft with limited opportunities for experimental test base and space centers.*

*Keywords: the aircraft, flight and technical characteristics, mathematical model.*

Достигнутый уровень качества и эффективности ракетно-космических комплексов (РКК) во многом зависит от состояния проблемы анализа соответствия достигнутых тактико-технических характеристик (ТТХ), по результатам летных испытаний (ЛИ) и тесно с ней связанной проблемы обеспечения надежного баллистико-навигационного обеспечения (БНО) испытаний и применения летательных аппаратов (ЛА) – ракет как элементов ракетно-космических комплексов РКК [1].

Содержание задач, решаемых в интересах первой проблемы, заключается в оценки адекватности расчетных математических моделей целевого применения РКК реальным условиям. Основным методом их решения является опытно-теоретический, суть которого состоит в проверке гипотез о согласии расчетных показателей целевого применения или основных летно-технических характеристик (ЛТХ) с результатами совокупности испытательных пусков по опытным обобщенным характеристикам. В целях более достоверного анализа или выявления причин возможной неадекватности, скрытых для аппарата математической обработки обобщенных характеристик, используется его параметрический аналог, исходными данными для которого являются конструктивные характеристики агрегатов и систем ЛА, определенным способом связанные с обобщенными характеристиками (далее называемые ЛТХ). Достоверность решения данного класса задач по результатам испытаний в

целом, которая может быть оценена априорно вероятностью ошибки 1-го рода – риск поставщика, и 2-го рода – риск заказчика, зависит от точности оценивания ЛТХ в каждом из испытательных пусков. Кроме того, огромное самостоятельное значение имеют результаты отдельных пусков по частным программам по причине уникальности испытываемых образцов и условий их применения [2].

Поэтому важность успешного решения задач оценивания ЛТХ и тесно связанных с ними задач БНО испытаний и применения ЛА (далее – задач оценивания характеристик ЛА) по результатам отдельных испытательных пусков представляется очевидной [3].

Несмотря на имеющиеся значительные результаты в данной области, следует обратить внимание на следующие особенности условий проведения летных испытаний.

1. Совершенствование образцов ЛА, расширение и повышение требований к ним, возможность применения ЛА в условиях, не предусмотренных тактико-техническими требованиями (ТТТ).

2. Существующие средства полигонного измерительного комплекса могут не обеспечить требуемую точность измерений в интересах решения ряда задач.

3. Точностные характеристики измерительных средств могут изменяться от эксперимента к эксперименту.

4. Отсутствие измерений ряда характеристик ЛА в связи с техническими и другими ограничениями.

5. Сокращение общего количества испытаний, требующее повышения точности оценивания характеристик ЛА в отдельных испытательных пусках.

6. Неопределенность ЛТХ на всем участке полета или на интервалах, или в определенный момент времени.

В связи с этим можно отметить сложившиеся противоречия в системе экспериментальной обработки РКК между совершенствованием образцов ЛА, расширением и повышением требований к ним, с одной стороны, и ограниченными возможностями экспериментально-испытательной базы (ЭИБ) полигона и организации испытаний, с другой стороны.

Данное противоречие может приводить к недостоверному решению рассматриваемых задач и, как следствие, к неэффективному целевому применению ЛА. Поэтому обеспечение требуемого качества решений задач оценивания характеристик ЛА в условиях сложившегося противоречия представляет актуальную проблему [4].

Помимо этого, характеристики ЛА имеют ряд существенных особенностей: изменяются во времени и пространстве; имеют случайный характер; разные характеристики взаимосвязаны; априорные сведения о характеристиках часто отсутствуют или ограничены.

Анализ характеристик ЛА по данным измерений усложняется косвенным характером измерительной информации, сбоями, коррелированностью погрешностью измерений, неопределенностью структуры и законов распределения погрешностей измерений. Это приводит к ограниченным возможностям применения классических методов анализа и выдвигает задачи дальнейшего совершенствования математического аппарата анализа характеристик ЛА. Для успешного решения задачи получения достоверных оценок характеристик ЛА на этапе полигонной отработки новых образцов РКК необходимо иметь эффективные математические модели характеристик ЛА и методы анализа в рамках принятых математических моделей [5].

Из большого числа математических моделей для анализа характеристик ЛА наиболее часто применяются: физико-математические модели, отражающие физические принципы и специфику работы систем ЛА, действующих сил и возмущений, функционирование ЛА; универсальные формальные математические модели, в частности многочленные модели: степенные, экспоненциальные, многочлены Чебышева, Фурье, Лежандра, усеченные ряды Тейлора, Кательникова и др.; математические модели случайных функций и полей. Методы анализа так или иначе опираются на математические модели характеристик ЛА. Основными являются следующие задачи анализа характеристик ЛА: интерполяция (экстраполяция); численные дифференцированные и интегрирование табличных значений характеристик; сглаживание; отбраковка; сжатие и восстановление данных о характеристиках; оценивание характеристик ЛА по экспериментальным данным; статистическое моделирование реализаций случайных функций и полей характери-

стик ЛА; поиск оптимальных значений характеристик ЛА. Общие методы решения указанных задач не всегда связаны с современными эффективными математическими моделями характеристик ЛА и недостаточно адекватно условиям функционирования и целевого применения ЛА. В результате общие методы часто не обеспечивают требуемой точности, достоверности и оперативности исследований характеристик ЛА.

Процесс совершенствования математических моделей и методов анализа привел к созданию сплайновых моделей. Сплайновые модели благодаря ограниченной гладкости и другим свойствам позволяют повысить точность, достоверность и оперативность анализа одномерных и двумерных характеристик ЛА. В классе сплайновых моделей особое место занимают локальные сплайны.

Исследования показали, что восстановленные функции не известной структуры по редким табличным точкам вручную опытными специалистами-экспертами и автоматически на основе локально-сплайновых моделей практически совпадают.

Сплайновые модели рассматриваются на ограниченном отрезке  $[t_1; t_j]$  с разбиением (сеткой) на нем  $\Delta: t_1 < t_2 < \dots < t_j$ .

Функция  $S_m, n(t)$  называется сплайном степени  $n$  дефекта  $m$  с узлами на сетке  $\Delta$ , если она удовлетворяет следующим условиям:

На каждом частном отрезке  $[t_j; t_{j+1}]$ ,  $j = 1, \dots, J-1$ , функция  $S_m, n(t)$  является многочленом степени  $n$ :

$$S_{n,m}(t) = \sum_{a=0}^n a_a^j (t - t_j)^a, \quad t \in [t_j; t_{j+1}].$$

Функция  $S_m, n(t)$  непрерывна и имеет в узлах сетки  $(n-m)$  непрерывных производных (обладает  $(n-m)$ -й степенью гладкости):

$$S_{n,m}^{(\mu)}(t_j - \delta) = S_{n,m}^{(\mu)}(t_j + \delta)$$

$$\text{при } \delta \rightarrow 0, \quad j = 1, \dots, J; \quad \mu = 0, 1, \dots, n-m.$$

Для получения достоверных оценок характеристик ЛА в информационно-измерительных системах производится сглаживание и сжатие данных измерений, передача и документирование сжатых данных, прием и восстановление измеряемых характеристик. В настоящее время используются разнообразные методы сглаживания, сжатия и восстановления информации. Эти методы оперативны и просты в реализации, но имеют некоторые недостатки: при обработке данных измерений применяются модели, не адекватные измеряемым характеристикам ЛА; обычно используются кусочно-непрерывные полиномы, имеющие разрыв самой функции или ее производной; при сжатии и восстановлении информации часто используются разные математические модели характеристик ЛА, что приводит к дополнительным погрешностям методического характера; применяемые математические модели и их параметры не оптимизируются с учетом случайных и методических погрешностей оцениваемых характеристик ЛА. Отмеченные недостатки значительно ослабляются, если в качестве моделей

характеристик ЛА использовать локально-сплайновые модели.

Таким образом, использование локально сплайновых моделей для получения оценок ЛТХ по результатам измерений при проведении летных испытаний позволит значительным образом повысить их точность и достоверность.

#### Библиографические ссылки

1. Ахматов И. И. Разработка методики повышения уровня безотказности выполнения операций процесса подготовки ракеты космического назначения к пуску : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : РГУИТПО, 2010. 23с.
2. Кобзарь А. А., Корнеев А. А. Проблемы получения достоверных оценок летно-технических характеристик при проведении летных испытаний новых образцов ВВТ и возможные пути их решения // Научно-технический сборник ВА РВСН имени Петра Великого. 2006. Вып. 236. С. 201–203.
3. Ключев В. В., Лозовский В. Н., Савилов В. П. Техническая диагностика деталей летательных аппаратов / под общ. ред. В. В. Ключева. М. : Спектр, 2015. 338 с.
4. Недайвода А. К. Технологические основы обеспечения качества ракетно: космической техники. М. : Машиностроение, 1998. 240 с.
5. Ахматов И. И. Моделирование процесса подготовки ракеты космического назначения к пуску // Полет : общероссийский научно-технический журнал. 2010. № 12.

#### References

1. Akhmatov I. I. Razrabotka metodiki povysheniya urovnya bezotkaznosti vypolneniya operatsiy protsessa podgotovki rakety kosmicheskogo naznacheniya k pusk. Avtoreferat dissertatsii kandidat tekhnicheskikh nauk. [Development of the method of raising the level of reliability to perform operations of the process of preparing the rocket for launch space transportation : Ph.d. dissertation.]. Moskva, RGUIPTYu, 2010. 23 p. (In Russ.)
2. Kobzar' A. A., Korneev A. A. [The problem of obtaining reliable estimates of performance characteristics when carrying out flight tests of new samples of IWT and possible ways to overcome them]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik VA RVSNI imeni Petra Velikogo. 2006. № 236. P. 201–203 (In Russ.)
3. Klyuev V. V., Lozovskiy V. N., Savilov V. P. [Technical Diagnostics of aircraft parts ]. Moskva : Spektr, 2015. 338 p. (In Russ.)
4. Nedayvoda A. K. [Technological fundamentals of quality assurance rocket: space technology]. Moskva : Mashinostroenie, 1998. 240 p. (In Russ.)
5. Akhmatov I. I. Modelirovanie protsessa podgotovki rakety kosmicheskogo naznacheniya k pusk. [Simulation of the process of preparing the rocket for launch space transportation]. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Polet». 2010. № 12. 60 p. (In Russ.)

© Баранов М. Е., Кравченко А. В.,  
Лапко Р. В., 2019

УДК 531.133.3

## ОЦЕНКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ КРЫЛЬЕВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ПРИ ИХ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ С ПОМОЩЬЮ РОБОКАРОВ

А. М. Малышенко, А. С. Беляев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30  
E-mail: belyaewas@mail.ru

*Рассмотрены и проанализированы основные методы обезвешивания элементов космических кораблей, используемые в ходе наземных испытаний. Рассмотрена возможность использования робокаров для обезвешивания крыльев солнечных батарей.*

*Ключевые слова: обезвешивание, крылья солнечных батарей, наземные испытания, робокар для обезвешивания.*

## SOLAR PANEL WINGS WEIGHTLESSNESS IMPLEMENTABILITY ESTIMATION IN A ROBOCAR-BASED GROUND TESTING

A. M. Malysenko, A. S. Belyaev

National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: belyaewas@mail.ru

*In this paper, the main methods for weighting spacecraft elements used during ground tests are considered and analyzed. The possibility of using robocars for weightlessness of the wings of solar panels is considered.*

*Keywords: weightlessness, solar wings, ground tests, robocar.*

Отечественные и зарубежные предприятия и организации, занимающиеся производством и испытаниями крыльев солнечных батарей (КСБ) для космических аппаратов, проводят их наземные испытания, как правило, на стендах, в которых отдельные элементы КСБ (штанги, рамы, панели) с целью имитации их работы в условиях невесомости обезвешиваются с использованием тросовых вывесок различных исполнений, силы натяжения в которых поддерживают равными весам этих элементов, а сами тросы вывески в процессе раскрытия удерживаются в вертикальном положении тем или иным способом.

Известны и широко распространены стенды с тросовыми подвесами и пассивными системами обезвешивания, когда к развешиваемому элементу КСБ через трос его вывески прикладывается подъемная сила, равная весу этого элемента и создаваемая с помощью тросово-блочных противовесов или регулируемых пружин. В последнем случае в стенде действуют каретки, которые перемещаются по двум горизонтальным направляющим, расположенным на одном или нескольких уровнях под потолком цеха. Такие каретки обеспечивают подвижность точек вывески тросов в двух направлениях – вдоль линии раскрытия крыла и в ортогональном к ней направлении в горизонтальной плоскости и поддерживают их текущее положение вслед за перемещениями обезвешиваемых ими элементов КСБ.

Примерами таких стендов с противовесами являются стенды, выполненные по патентам RU № 2468969, RU № 2483991, US № 5110194, а с использованием регулируемых пружин – по патентам RU № 2516880, CN № 102145755.

Основным недостатком стендов с пассивными вариантами обезвешивания испытуемых изделий является относительно невысокая точность такого обезвешивания и влияние на процессы его раскрытия всех тех частей стенда, на перемещения которых затрачивается энергия встроенных в испытуемое изделие приводов его раскрытия (эффект присоединенных масс). С увеличением массы испытуемого изделия это влияние на точность имитации его невесомости и указанные энергозатраты существенно возрастают.

Известны также стенды для наземных испытаний складных многозвенных конструкций космических аппаратов с тросовыми вывесками элементов этих конструкций и с активными системами их обезвешивания. В подобных случаях используемые в стенде подвижные средства приводятся в движение от других приводных устройств, а не встроенными в испытуемое изделие приводами. К числу таких стендов, в частности, относятся стенды, реализуемые по патентам US № 5379657, RU № 2402470.



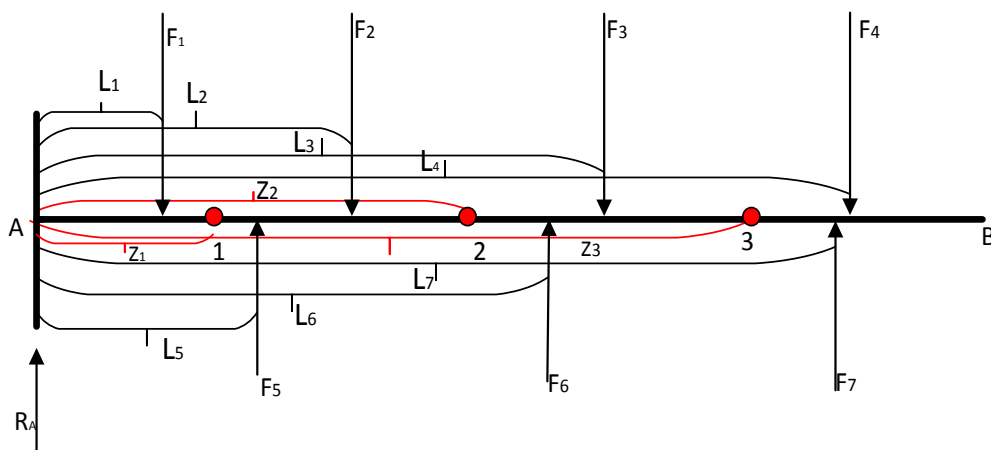


Схема нагрузок, действующих на крыло солнечной панели

В стендах почти исключается «эффект присоединенных масс», но конструктивное исполнение такого стенда значительно сложнее, причем вся основная часть стенда для испытаний размещена над испытуемым изделием высоко под потолком, что затрудняет их монтаж и эксплуатацию во время испытаний, создает более опасные условия для обслуживающего персонала, вызывает повышенную колебательность КБС при раскрытии [1].

Альтернативным тросовым вариантам обезвешивания испытуемых на стендах изделий является использование специализированных подвижных транспортных средств (тележек, робокаров), с помощью которых силы обезвешивания прикладываются к раскрываемым частям испытуемого изделия не сверху, а снизу. При этом все используемые для этого средства располагаются под испытуемым изделием, что значительно удобнее для эксплуатации по сравнению с тросовыми вариантами вывески изделия. Сами транспортные тележки легкодоступны для ремонта и наладки. Более того, в подобных тележках вся аппаратура управления, источники энергопитания, необходимые измерительные устройства и исполнительные устройства (если они предусматриваются) сосредоточены на них и это существенно упрощает каналы связи между ними.

Подобные транспортные тележки использовались, в частности, для обезвешивания крыльев солнечных батарей космического зонда MAVEN при их наземных испытаниях компанией Lockheed Martin Space Systems в марте 2013 г. [2].

Такой вариант обезвешивания существенно проще, чем тросовый. Но ему также характерен «эффект присоединенных масс». К тому же, он заведомо не нацелен на создание при наземных испытаниях условий абсолютной инвариантности процесса раскрытия КБС от их веса. В этой связи в докладе предлагается замена подобных транспортных тележек на робокары с размещенными на них опорами для крепления на них обезвешиваемых частей КБС и приложения к ним подъемных сил. Такие робокары должны в процессе раскрытия КБС перемещаться на горизонтальной

опорной поверхности и поддерживать установленные на них опоры в вертикальном положении.

Для решения задачи обезвешивания необходимо решить 2 подзадачи:

- 1) определиться с количеством робокаров для обезвешивания;
- 2) определиться с расстановкой робокаров;

Для решения данных подзадач необходимо провести расчет нагрузок, действующих на крыло. Представим его в раскрытом состоянии, как показано на рисунке, в виде жесткой балки длиной 11,49 м с левой стороны имеющей шарнирную заделку (точка А), моделирующую присоединение к корпусу космического аппарата. Вес каждой панели и штанги опишем в виде сосредоточенных сил, приложенных к центрам масс и обозначим их как  $F_1, F_2, F_3, F_4$ . Для определения количества робокаров в системе обратимся к формулировке задачи обезвешивания: необходимо скомпенсировать вес обезвешиваемых элементов и минимизировать энергетические потери приводов КБС, затрачиваемые на силы трения, имеющиеся в шарнирах солнечных панелей

Так как крыло солнечных панелей состоит из 4-х элементов, 3 из которых являются непосредственно панелями и обладают большей массой, по сравнению с весом штанги, то для решения задачи обезвешивания необходимо разместить опоры под центрами масс каждого элемента, однако так как вес штанги в разы меньше веса панелей, то при решении задачи обезвешивания данной характеристикой пренебрегают и компенсируют исключительно вес солнечных панелей. В результате получаем что, для решения данной задачи необходимо использовать минимум 3 опоры. Обозначим силы обезвешивания, создаваемые робокарами, в виде сосредоточенных сил  $F_4, F_5, F_6$ . Для минимизации моментов, создаваемых в шарнирах и компенсации веса панелей, определим уравнения сил и моментов, действующих в полученной модели:

$$M_A = -F_1 \cdot L_1 - F_2 \cdot L_2 - F_3 \cdot L_3 - F_4 \cdot L_4 - F_5 \cdot L_5 - F_6 \cdot L_6 - F_7 \cdot L_7,$$

$$R_A = -F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7,$$

$$\begin{aligned}
 M_1 &= M_A + R_A \cdot z_1 - F_1(z_1 - L_1), \\
 M_2 &= M_A + R_A \cdot z_2 - F_1(z_2 - L_1) - \\
 &\quad - F_2(z_2 - L_2) + F_5(z_2 - L_5), \\
 M_3 &= M_A + R_A \cdot z_3 - F_1(z_3 - L_1) - F_2(z_3 - L_2) + \\
 &\quad + F_5(z_3 - L_5) + F_6(z_3 - L_6),
 \end{aligned}$$

где  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7$  – расстояния от точки  $A$  до каждой силы;  $z_1$  – расстояние от точки  $A$  до шарнира 1,  $z_2$  – расстояние от точки  $A$  до шарнира 2,  $z_3$  – расстояние от точки  $A$  до шарнира 3. В результате при подсчете моментов и нагрузок в модели, с учетом минимизации моментов в шарнирах, получены следующие эпюры.

Силы и положения робокаров:  $F_5 = -245$  Н;  $F_6 = -195$  Н;  $F_7 = -299$  Н;  $L_5 = 2.895$  м.;  $L_6 = 5,829$  м;  $L_7 = 9,289$  м.

Моменты в шарнирах равны:  $M_A = -7,7$  Н·м;  $M_1 = -5,5$  Н·м;  $M_2 = -2,6$  Н·м;  $M_3 = -0,5$  Н·м.

Данная расстановка, позволяет выставить робокары с условием минимизации моментов в шарнирах крыла солнечной батареи и скомпенсировать вес обезвешиваемых элементов КБС до приемлемых значений при наземных испытаниях.

### Библиографические ссылки

1. Sentinel-1: Solar wing test [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=oIQN6ZvYErk> (дата обращения: 13.09.2019).
2. Ken Kremer. MAVEN Takes Final Test Spins, Flexes Solar Panels Before Imminent Trek to Florida Launch Site [Электронный ресурс]. URL: <http://www.universetoday.com/103858/maven-takes-final-test-spins-flexes-solar-panels-before-imminent-trek-to-florida-launch-site/> (дата обращения: 13.09.2019).

### References

1. Sentinel-1: Solar wing test [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=oIQN6ZvYErk> (accessed: 13.09.2019).
2. Ken Kremer. MAVEN Takes Final Test Spins, Flexes Solar Panels Before Imminent Trek to Florida Launch Site [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.universetoday.com/103858/maven-takes-final-test-spins-flexes-solar-panels-before-imminent-trek-to-florida-launch-site/> (accessed: 13.09.2019).

© Малышенко А. М., Беляев А. С., 2019

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОСНАСТКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНОЙ БА НА ПИРОУДАРНЫЕ НАГРУЗКИ

М. В. Пустобаев\*, А. В. Шматов, Б. И. Зубренков, А. О. Грабилин, Д. В. Деришев

АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А. Г. Иосифьяна»  
Российская Федерация, 107078, г. Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1  
\*E-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com

*Испытания бортовой аппаратуры космических аппаратов проводятся для подтверждения ее стойкости к внешним воздействующим факторам, в том числе механическим. В случае испытаний на стойкость к пироударным нагрузкам (нестационарной вибрации) БА больших размеров и массы возникают специфические проблемы, связанные в том числе с неравномерностью возбуждения нагрузок в местах крепления БА. Представлен подход к проектированию и выбору оснастки для испытаний крупногабаритной БА при использовании испытательного оборудования, имеющего ограничения по величине создаваемого воздействия (например, на базе строительного пистолета).*

*Ключевые слова: пиротехнический удар, нестационарная вибрация, испытания, бортовая аппаратура, оснастка.*

## FIXTURE SELECTION SPECIFICS FOR PYROSHOCK TESTING OF LARGE SPACE ONBOARD EQUIPMENT

M. V. Pustobaev, A. V. Shmatkov, B. I. Zubrenkov, A. O. Grabilin, D. V. Derishev

<sup>1</sup>JSC “Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’” named after A. G. Iosifian”  
4/1, Khoromny tупik, 107078, Moscow, Russian Federation  
\*E-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com

*Space onboard equipment is subjected to various mechanical tests in order to meet severe mechanical specifications. In case of pyroshock testing of space equipment with bigger mass/dimensions specific problems are to be solved, e. g. caused by non-uniformity of response spectra measured at different mounting points. For testing equipment with limited load capabilities, (e.g. power-actuated fastening tool) new approach for fixture design/selection is presented.*

*Keywords: pyroshock testing, space equipment, large, fixture.*

**Введение.** Для испытаний БА на пиротехнический удар существуют различные методики, в основе которых, как правило, лежит подбор оснастки для обеспечения частоты перехода приспособления в районе 1–3 кГц (плиты).

В случае крупногабаритной БА масштабирование подобного подхода становится трудно выполнимым, особенно если имеются ограничения по мощности испытательного оборудования. Поэтому для выбора оснастки при проведении испытаний подобной БА приходится применять нестандартные методы крепления, один из которых представлен в данной работе.

К крупногабаритной БА авторы относят БА с массой более 15–20 кг и/или имеющую несколько точек крепления, разнесенных друг от друга на расстояние ~400–500 мм и более.

Созданный и функционирующий в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» стенд [1; 2] (аттестован по ГОСТ РВ 0008–002) использует в качестве основного

источника ударных нагрузок строительный пистолет, в котором используются стандартные патроны типа Д1–Д5, имеющие ограниченную мощность заряда. Использование серийных патронов массового применения позволяет удешевить процесс испытаний, что является существенным фактором в силу того, что подбор режима испытаний носит преимущественно экспериментальный характер (при подборе режима проводится подрыв пироударников с различными схемами крепления БА, с применением габаритно-массового макета изделия).

В силу ограничений по мощности патронов использование переходных плит большого размера и массы является невозможным, так как при этом не обеспечивается требуемая энергетика удара, т. е. не реализуется требуемый уровень спектра удара (2500–5000 г на высоких частотах).

В качестве альтернативного решения в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» был разработан универсальный способ крепления, позволяющий осуществлять кре-

пление крупногабаритной БА во время испытаний. Для крепления БА были использованы две пары сдвоенных труб квадратного сечения с прорезями, так называемые «рельсы».

Пример крепления БА приведен на рис. 1. На рис. 1, б способ применен для группового закрепления нескольких приборов.

Датчики при испытаниях были установлены на переходных кубиках, всего 4 розетки. В соответствии с п. 4.9 действующего ГОСТ [3] «при испытаниях разрешается контролировать испытательный режим по среднеарифметическому значению параметров механического фактора, измеренных в нескольких точках крепления аппаратуры, либо по огибающей значений этих параметров. Число точек и место их расположения указывают в ПИ и ТУ».

В АО «Корпорация» ВНИИЭМ» для испытаний используется типовая программа и методика испытаний, в которой, по аналогии с международным опытом отработки [4] используется усреднение по датчикам, расположенным в различных точках крепления изделия (от 2 до 4) (NASA-STD-7003A).

На рис. 2, 3 показаны результаты испытаний для приведенных выше блоков. Приведенное на рисунках поле допуска составляет  $\pm 6$  дБ.

Возможность использования оснастки определяет частотным составом приспособления, который и определяет точку перегиба спектра удара. Как видно из рис. 2, 3, можно констатировать, что универсальную оснастку типа «рельсы» можно использовать при проведении испытаний крупногабаритной БА, т. е. для подобной БА существует адекватная замена более «традиционному» способу проведения испытаний с подбором плиты. Границы метода и оптимальная область применения – подлежат уточнению.

У данного способа закрепления существуют ограничения и недостатки. Во-первых, использование болтовых соединений (а не сварки) приводит к «вытягиванию» резьбы на шпильках, и к необходимости периодической протяжки соединений и замены шпилек. Во-вторых, настройка стенда для испытаний занимает существенное время (испытания 1 блока по 6 ударов вдоль каждой оси с учетом протяжки соединений в итоге заняло 4 часа).



а



б

Рис. 1. Закрепление БА на «рельсах», на примере прибора ША1351 из состава аппаратуры «БИНК-М1» (а), на примере приборов КВП из состава аппаратуры ЛА923 (б)

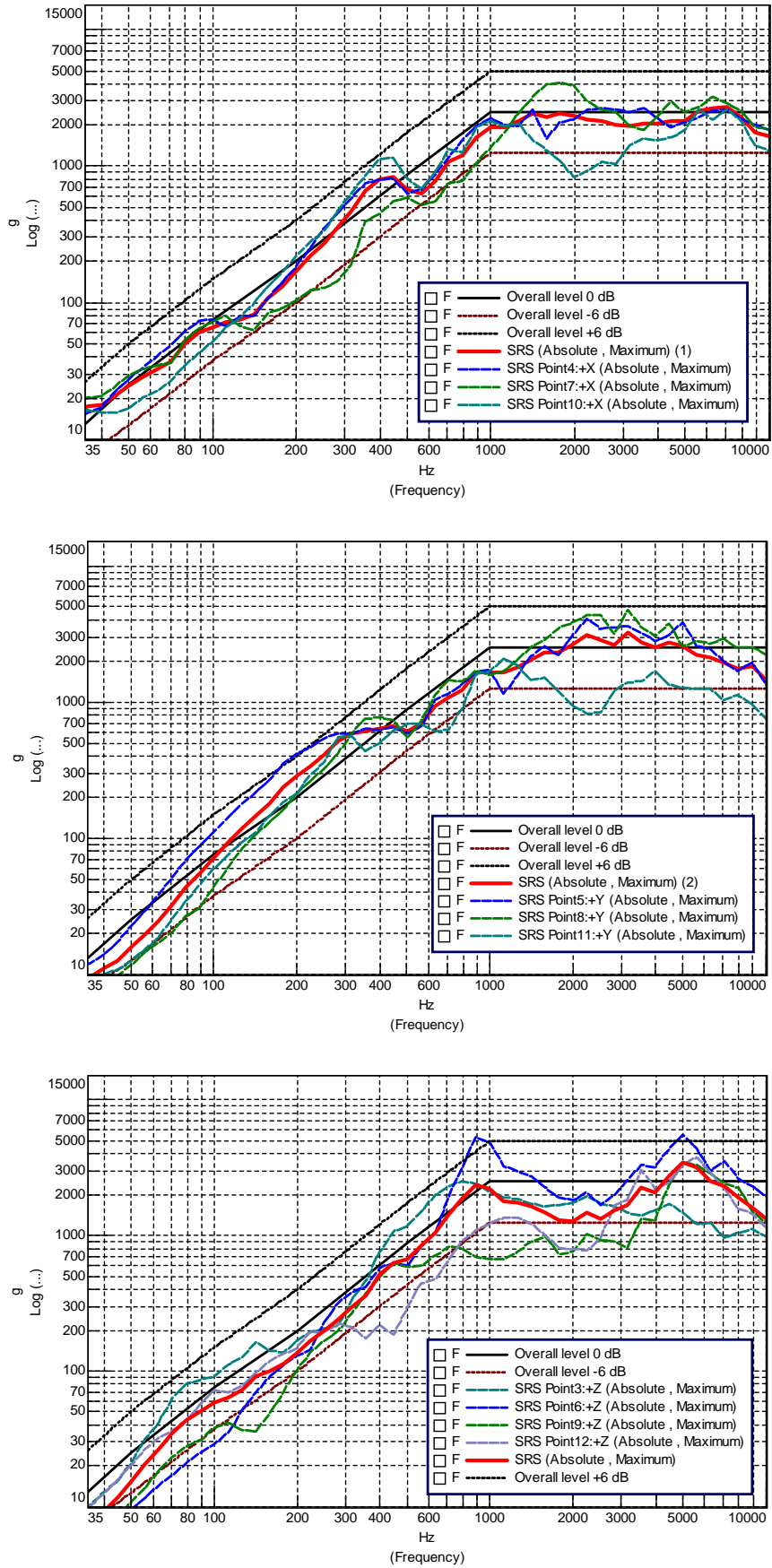


Рис. 2. Результаты испытаний ША1351 по осям X, Y, Z.  
Красной линией показано среднее значение

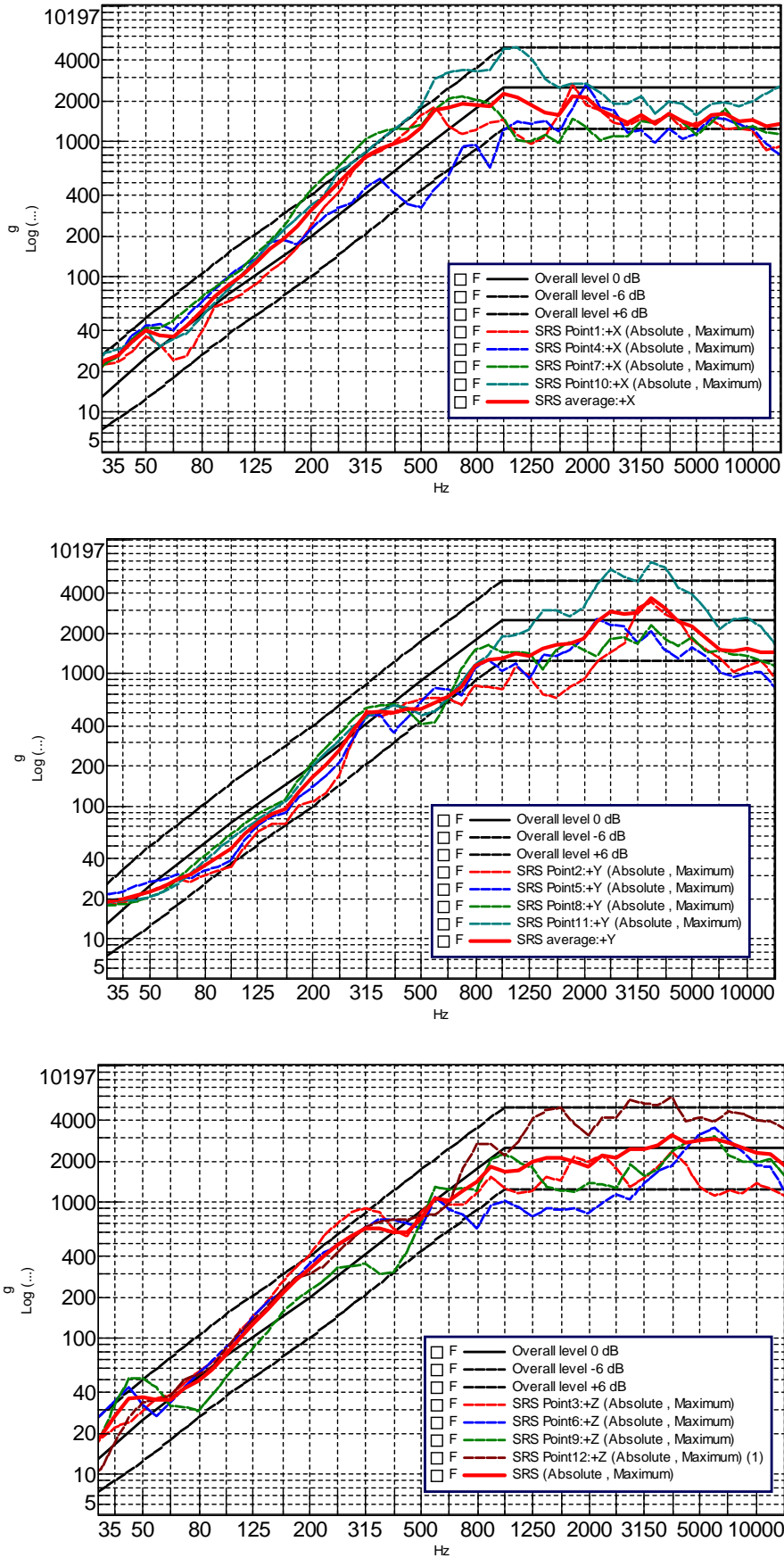


Рис. 3. Результаты испытаний КВП по осям X, Y, Z.  
Красной линией показано среднее значение

Также для более детального изучения возможности группового применения следует установить дополнительный акселерометр по центру плиты и провести дополнительную серию исследований.

#### Библиографические ссылки

1. Моделирование режимов ударного нагружения на аппаратуру КА при срабатывании пиротехнических средств разделения / А. О. Грабилин и др. // Тр. ВНИИЭМ. 2014. № 138(1). С. 35–42.
2. Пустобаев М. В. Экспериментально-теоретическое исследование характеристик системы «Стенд с объектом испытаний/ударное устройство» для испытаний бортовой аппаратуры // Тр. ВНИИЭМ. 2014. № 141(4). С. 55–60.
3. ГОСТ РВ 20.57.305–98 КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов. М. : Изд-во стандартов, 1998.
4. Bateman V. I., Davie N. T. “Pyroshock Testing,” Shock and Vibration Handbook (A. G. Piersol and T. L. Paez, Ed.), 6th ed. New York : McGrawHill, 2010. Chapter 28.

#### References

1. Modelirovanie rezhimov udarnogo nagruzheniya na apparaturu KA pri srabatyvanii pirotekhnicheskikh sredstv razdeleniya [Space Equipment Pyroshock Modelling caused by Separation Systems Operation] / A.O. Grabilin et al. // Tr. VNIIEМ. 2014. № 138(1). P. 35–42 (In Russ.)
2. Pustobaev M. V. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie kharakteristik sistemy «Stend s ob"ektom ispytanii/udarnoe ustroystvo» dlya ispytanii bortovoi apparatury // Tr. VNIIEМ. 2014. № 141(4). P. 55–60 (In Russ.)
3. GOST R V 20.57.305–98 (Russian national standard) Apparatus, instruments, devices and equipment for military use. Test methods for exposure to mechanical factors. Moskva : Publishing house of standards, 1998.
4. Bateman V. I., Davie N. T. “Pyroshock Testing,” Shock and Vibration Handbook (A. G. Piersol and T. L. Paez, Ed.), 6th ed. New York : McGrawHill, 2010. Chapter 28.

© Пустобаев М. В., Шматков А. В., Зубренков Б. И.,  
Грабилин А. О., Деришев Д. В., 2019

УДК 629.016

## ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Т. А. Пчелкина, Е. А. Карелина, А. А. Снежко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: tat0401@yandex.ru

*Представлен алгоритм обработки измерительной информации для определения отклонений формы и расположения пространственных реальных элементов деталей на координатно-измерительных машинах; обозначены вероятные причины появления погрешностей при измерительном процессе.*

*Ключевые слова: координатные измерительные машины, автоматическое измерение, ручное измерение, полуавтоматическое измерение, датчик, программа.*

## FEATURES OF ENSURING THE UNITY OF LINEAR-ANGULAR MEASUREMENTS

T. A. Pchelkina, E. A. Karelina, A. A. Snezhko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tat0401@yandex.ru

*An algorithm for processing measurement information is presented to determine deviations in the shape and location of spatial real elements of parts on coordinate measuring machines; probable causes of errors during the measurement process are indicated.*

*Keywords: coordinate measuring machines, automatic measurement, manual measurement, semi-automatic measurement sensor program.*

Прогресс в передовых отраслях техники, в том числе, в ракетостроении, уже привел к необходимости изготовления деталей сложной формы поверхности, определяемой часто эмпирическим путем и описываемой математическими моделями. Для получения таких деталей в формообразующих технологиях уже недостаточно контролировать размеры. Необходимо контролировать форму, что достаточно сложно обеспечить традиционными средствами измерения. Для контроля формы требуется измерять координаты точек поверхности детали в трехмерном пространстве, следуя по запрограммированной траектории, что без труда выполняет координатно-измерительная машина (КИМ) и справедливо считается современным перспективным измерительным оборудованием [1].

Большинство КИМ приобретаются за рубежом и являются нестандартизированными средствами измерений. В связи, с чем необходимо разрабатывать методики выполнения измерений (МВИ) для типовых деталей, выпускаемых на отечественных предприятиях, с их последующей апробацией и аттестацией. Индивидуальные конструктивные особенности КИМ, безусловно, влияют на результат измерений.

КИМ представляет собой устройство для измерения физических, геометрических характеристик объекта. Машина может управляться вручную оператором или в автоматическом режиме через компьютер.

На КИМ фиксируют только координаты в пространстве отдельных точек измеряемой поверхности, а значения размеров отдельных элементов и других нормируемых параметров геометрической точности рассчитываются по этим измеренным координатам [2].

Геометрия детали в системе конструкторской документации задаётся в номинальной системе координат проекта детали *номинальными поверхностями*. Нормальная поверхность - это идеальная поверхность без учёта отклонений формы и расположения в номинальной системе координат проекта. Геометрию детали и *реальных поверхностей* детали можно представить только в системе координат системы измерения. Реальная поверхность – это поверхность с учётом отклонений формы и расположения в системе координат системы измерения.

В соответствии с ГОСТ 24642–81 [3] отклонение формы реальных поверхностей деталей определяется в системе координат системы измерения координатно-измерительных машин (КИМ) по расстоянию точек реальных поверхностей от точек номинальных поверхностей, представленных условно номинальными поверхностями в системе координат проекта детали. Поэтому первой и главной задачей является однозначное определение положения номинальной системы координат каждой поверхности с номинальной геометрией поверхности в системе координат системы измерения.

Алгоритмом обработки измерительной информации КИМ является обработка информации, полученной координатно-измерительной машиной в системе координат системы измерения – получение протокола обработки измеренных координат реальных поверхностей деталей с указанием всех геометрических параметров отклонений формы и расположения всех поверхностей детали.



Наиболее общий алгоритм имеет следующий вид:

1. Вначале требуется создать и сохранить номинальную 3D-геометрию детали в номинальной системе координат проекта и определить в ней положение номинальной системы координат каждой номинальной поверхности. Для плоскостей это будут координаты точек, принадлежащих плоскостям и направления нормалей к плоскостям. Для поверхностей вращения – координаты точек, принадлежащие осям и направления осей вращения. Для остальных поверхностей детали – координаты точек начал собственных координат поверхностей и направления осей систем координат номинальных поверхностей в номинальной системе координат проекта детали.

2. Выбрать базу (любую выбранную систему координат или номинальную систему координат одной из номинальных поверхностей) и определить в ней параметры номинального положения нормалей к плоскостям, осей поверхностей вращения и номинальных систем координат номинальных поверхностей. На этом заканчивается предварительная подготовка информации о номинальной геометрии детали.

3. С помощью КИМ измерить и определить координаты массивов точек реальных поверхностей в системе координат системы измерения. Каждому массиву соответствует реальная поверхность.

4. По найденным положениям систем координат номинальных поверхностей в системе координат системы измерения определить отклонения формы реальных поверхностей. Определить координаты точек реальных поверхностей наиболее и наименее удалённых от номинальных поверхностей, размещённых в системе координат системы измерения.

5. Построить *эквиливанты* к номинальным поверхностям по наиболее и наименее удалённым точкам. Выделить границы реальных поверхностей детали. Эквиливантой является геометрическое место точек, удалённых от данной плоской кривой или поверхности на данное расстояние в заданном направлении (наружу или внутрь).

6. Положение нормалей к плоскостям, осей поверхностей, «похожих» на тело вращения, и номинальных систем координат реальных поверхностей всех видов определяет расположение реальных поверхностей детали в системе координат системы измерения.

7. Выбрав базу в системе координат системы измерения, определить по отношению к ней численные параметры расположения систем координат реальных поверхностей, осей осесимметричных поверхностей и нормалей к поверхностям, «похожим» на плоскости.

8. Сравнить определённые параметры расположения с аналогичными в номинальной системе координат проекта детали и определить погрешности расположения реальных поверхностей. Составить протокол результатов определённых погрешностей формы и расположения реальных поверхностей детали.

9. Сопоставить с требованиями по отклонениям формы и расположения поверхностей детали и оформить результаты измерений детали в соответствии с требованиями [4].

При каждом проведении измерений КИМ существует вероятность погрешности. Любое изменение температуры помещения, в котором находится КИМ, изменяет геометрию, как структуры машины, так и детали. С этой целью в КИМах присутствует система температурной компенсации, которая уменьшает погрешности, обусловленные изменением температуры и влияющих на результат измерения.

Щуп, прикрепленный к измерительной оси машины, осуществляет сбор данных при соприкосновении с деталью. Щупы имеют различные уровни повторяемости, точность машины, к которой прикреплен щуп, является определяющим фактором в общей точности. Имеются и ряд других факторов, влияющих на точность системы, например, способы касания щупом поверхности детали, контактирование щупа с деталью не наконечником, а хвостиком стержня щупа. Загрязнение наконечника щупа хотя бы в один микрон, а так же точность зависит от профессионализма оператора машины.

Фиксирование детали – это основной аспект планирования стратегии измерения. Неправильная фиксация может привести к деформации детали и перекрытию существенной части допуска детали. Эту проблему может усугубить изменение температуры в момент измерения [5].

#### Библиографические ссылки

1. КИМ – продукт и средство высоких технологий [Электронный ресурс]. URL: [http://lapic.ru/EN/Statii/KIM\\_Produnkt\\_i\\_sredstvo\\_visokih\\_tehnologiy/](http://lapic.ru/EN/Statii/KIM_Produnkt_i_sredstvo_visokih_tehnologiy/) (дата обращения: 29.08.2019).
2. Координатно-измерительная техника фирмы Carl Zeiss: Каталог. С. 12.
3. ГОСТ 24642–81. Допуски формы и расположения поверхностей. М., 1981.
4. Кашуба Л. А. Алгоритм обработки информации, полученной при измерении реальной геометрии деталей на координатно-измерительных машинах // Системный анализ в науке и образовании. 2011. Вып. 3.
5. Координатно-измерительные машины «Global»: Руководство пользователя.

#### References

1. KIM – produkt i sredstvo vysokih tekhnologij [Electronic resource]. URL: [http://lapic.ru/EN/Statii/KIM\\_Produnkt\\_i\\_sredstvo\\_visokih\\_tehnologiy/](http://lapic.ru/EN/Statii/KIM_Produnkt_i_sredstvo_visokih_tehnologiy/) (accessed: 29.08.2019).
2. Koordinatno-izmeritel'naya tekhnika firmy Carl Zeiss: Katalog. P. 12.
3. GOST 24642–81. Dopuski formy i raspolozheniya poverhnostej. Moskva, 1981.
4. Kashuba L. A. Algoritm obrabotki informacii, poluchenoj pri izmerenii real'noj geometrii detalej na koordinatno-izmeritel'nyh mashinah // Sistemnyj analiz v nauke i obrazovanii. 2011. № 3.
5. Koordinatno-izmeritel'nye mashiny “Global”: Rukovodstvo pol'zovatelya.

© Пчелкина Т. А., Карелина Е.А., Снежко А. А., 2019

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М. В. Синева<sup>1,2</sup>, Г. С. Воеводкин<sup>1,2</sup>, Н. Т. Вагапова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное предприятие «Квант»  
Российская Федерация, 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., 16

E-mail: otдел\_17@npp-kvant.ru

<sup>2</sup>НИТУ «МИСиС»

Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4

*Солнечные элементы (СЭ) космического назначения подвергаются влиянию различных факторов. Для анализа степени их воздействия предложена методика оценки каскадов СЭ. На АО «НПП «Квант» проводился эксперимент по применению универсальной методики.*

*Ключевые слова: многокаскадный солнечный элемент, полупроводниковые материалы АШВУ, вольт-амперная характеристика, электролюминесцентная спектроскопия, внешний квантовый выход фотоотклика.*

## THE UNIVERSAL METHOD TO EVALUATE ELECTRIC PARAMETERS OF MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS

M. V. Sineva<sup>1,2</sup>, G. S. Voevodkin<sup>1,2</sup>, N. T. Vagapova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>OJS "Science production enterprise "Kvant"  
16, 3rd Mytishchi Str., Moscow, 129626, Russian Federation

E-mail: otдел\_17@npp-kvant.ru

<sup>2</sup>National University of Science and Technology MISIS

4, Leninsky Av., Moscow, 119049, Russian Federation

*The factors of space affect solar panels on spacecraft. Universal method allows you to evaluate the parameters of solar cells cascades. OJS "SPE "Kvant" conducted an experiment using universal method.*

*Keyword: multi-junction solar cell, III-V semiconductors, I-V characteristics, electroluminescent spectroscopy, external quantum efficiency.*

Одной из важных составляющих космических аппаратов является бортовая энергетика, в частности солнечные батареи (СБ). Во время эксплуатации СБ подвергаются воздействию различных факторов космического пространства – радиации, термоциклированию, электризации и другое, что значительно снижает срок активного существования первичного источника питания бортовой аппаратуры космического аппарата.

На сегодняшний день на предприятиях, промышленно выпускающих СЭ и СБ космического назначения, оценивают их характеристики с помощью измерений вольт-амперной характеристики (ВАХ). Однако данный экспресс-метод не позволяет определить электрические параметры (например, плотность тока короткого замыкания ( $J_{кз}^i$ ) и напряжение холостого хода ( $U_{хх}^i$ )) каждого каскада в отдельности. Разработка универсальной методики, основанной на данных, полученных из исследования спектральных характеристик СЭ, позволит определить степень воздействия того или иного фактора космического пространства, подобрать наиболее оптимальный режим отжига СЭ, а также определить наиболее уязвимый каскад структуры, что будет полезно для разработчиков и производителей СЭ.

**Особенность многокаскадных СЭ.** Современный многокаскадный СЭ космического назначения – это фотоэлектрический преобразователь высокой эффек-

тивности, который в общих чертах представляется как конструкция из последовательно соединенных каскадов (*GaInP/ GaInAs/ Ge*). Каждый каскад эффективно работает в соответствующих диапазонах спектра солнечного излучения [1].

Сложность заключается в том, что выходной ток СЭ такого типа ограничивается каскадом, генерирующим ток минимальной величины, а выходное напряжение является суммой напряжений каждого каскада. Ввиду этого принятый за стандарт метод исследования СЭ, измерение ВАХ, затрудняет определение вклада каждого каскада как по напряжению, так и по току. Для решения данной проблемы предлагается использовать данные полученные из спектральных характеристик СЭ [1].

**Описание предлагаемой методики оценки электрических параметров каскадов СЭ.** В предлагаемой методике используется электролюминесцентная спектроскопия, которая основана на съемке спектров в результате излучательной рекомбинации электронов и дырок в полупроводниковом материале при пропускании через СЭ постоянного тока в прямом направлении. Также исследуется внешний квантовый выход фотоотклика ( $Q_{вн}$ ), метод съемки которого основан на получении сигнала от конкретного каскада с помощью засветки структуры СЭ таким образом, чтобы исследуемый каскад выдавал наименьший фототок и, следовательно, ограничивал ток всего СЭ [2–4].

## Результаты расчета напряжения холостого хода каждого каскада СЭ

Материал каскада	$J_{КЗ}^i$ , МА/см <sup>2</sup>	$J_{КЗ}^{СЭ теор}$ , МА/см <sup>2</sup>	$J_{КЗ}^{СЭ эксп}$ , МА/см <sup>2</sup>	$\Delta J_{КЗ}^{СЭ}$ , %	$U_{XX}^i$ , В	$U_{XX}^{СЭ теор}$ , В	$U_{XX}^{СЭ эксп}$ , В	$\Delta U_{XX}^{СЭ}$ , %
До отжига								
InGaP	18,41	18,36	17,42	5,39	1,36	2,69	2,72	1,10
InGaAs	18,36				1,12			
Ge	21,14				0,21			
После отжига								
InGaP	18,44	18,33	17,48	4,86	1,36	2,69	2,72	1,10
InGaAs	18,33				1,12			
Ge	21,50				0,21			
Относительное изменение в результате отжига, %								
InGaP	0,16	0,16	0,34	–	0	0	0	–
InGaAs	0,16				0			
Ge	1,70				0			

Из спектральной зависимости  $Q_{вн}$  рассчитывается плотность тока короткого замыкания каждого каскада СЭ ( $J_{КЗ}^i$ ). Для определения напряжения холостого хода каждого каскада СЭ ( $U_{XX}^i$ ) строится зависимость пиков электролюминесценции от плотности тока инжекции. Проводится аппроксимация кривой и определяется напряжение при минимальной плотности тока инжекции по уравнению, выведенному из уравнения оптоэлектронного соотношения спектральной взаимности, приведенного в работе [3]. Затем определяется напряжение при плотности тока инжекции равной  $J_{КЗ}^i$ . При расчете должно быть учтено «напряжение смещения», которое определяется из разности суммарного напряжения, определенного по электролюминесцентной спектроскопии при плотности тока инжекции равной  $J_{КЗ}^i$  и экспериментальной величины ( $U_{XX}^{СЭ эксп}$ ) напряжения холостого хода СЭ, полученной из измеренной ВАХ [2; 3; 5].

Для апробации предложенной методики на АО «НПП «Квант» проводились экспериментальные работы по определению степени влияния термического отжига (в течение четырех часов при температуре 160 °С) на электрические параметры СЭ со структурой *GaInP/ GaInAs/ Ge*. Результаты представлены в таблице. В результате отжига ( $J_{КЗ}^i$ ) верхнего и нижнего каскадов увеличился на 0,16 и 1,70 % соответственно, обратная ситуация для среднего каскада. Для величины  $U_{XX}^i$  изменений не наблюдалось. Отклонение теоретической ( $J_{КЗ}^{СЭ теор}$ ) от экспериментальной ( $J_{КЗ}^{СЭ эксп}$ ) величин плотности тока короткого замыкания СЭ составило в среднем 5 %. Аналогичное для напряжения – 1,1 %. Таким образом, предложенная методика позволит оценить минимальные изменения при воздействии, например, термического отжига.

Рассмотрены ограничения метода измерения ВАХ. Предложена новая методика оценки электрических параметров многокаскадных СЭ, основанная на электролюминесцентной спектроскопии и исследовании внешнего квантового выхода фотоотклика СЭ. Проведена успешная апробация методики, которая позволит исследовать образцы разного размера и формы,

как сам фотопреобразователь, так и в сборке (фотопреобразователь с приваренным шунтирующим диодом, коммутирующими шинами, а также лицевым и тыльным защитным стеклом).

## Библиографические ссылки

1. Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АІІІВV / Е. В. Слыщенко, А. А. Наумова, А. А. Лебедев и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 308–324.
2. Subcell light current-voltage characterization of irradiated Multijunction solar cell / D. Walker et al. // E3S Web of Conferences 16, 2017. P. 1–3.
3. Kirchartz Th., Rau U. What Makes a Good Solar Cell? // Adv. Energy Mater, 2018. Vol. 8. 1703385. P. 1–19.
4. Ananda W. External quantum efficiency measurement of solar cell electronic and emc laboratory center for material and technical product. Ieee, 2017.
5. Thorough subcells diagnosis in a multi-junction solar cell via absolute electroluminescence-efficiency measurements / C. Shaoqiang, L. Zhu, Y. Masahiro et al. // *Scientific Reports*. 2015.

## References

1. Slyshchenko E. V., Naumova A. A., Lebedev A. A., Genali M. A. et al. The review of modern solar cells for space application based on АІІІВV materials // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 19, № 2. P. 308–324.
2. Subcell light current-voltage characterization of irradiated Multijunction solar cell / D. Walker et al. // E3S Web of Conferences 16, 2017. P. 1–3.
3. Kirchartz Th., Rau U. What Makes a Good Solar Cell? // Adv. Energy Mater. 2018. Vol. 8. 1703385. P. 1–19.
4. Ananda W. External quantum efficiency measurement of solar cell electronic and emc laboratory center for material and technical product // *Ieee*. 2017.
5. Thorough subcells diagnosis in a multi-junction solar cell via absolute electroluminescence-efficiency measurements / C. Shaoqiang, L. Zhu, Y. Masahiro et al. // *Scientific Reports*, 2015.

© Синева М. В., Воеводкин Г. С., Вагапова Н. Т., 2019

## ИМИТАЦИЯ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ В СРЕДЕ SIMINTECH

В. В. Устименко, Л. А. Михайленко

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: zeya1998@mail.ru

*Представлены результаты разработки модели термовакuumных испытаний в среде динамического моделирования технических систем SimInTech. Подтверждена адекватность разработанной модели.*

*Ключевые слова: термовакuumная камера, термовакuumные испытания, динамическое моделирование, SimInTech.*

## SIMULATION OF THERMAL VACUUM TESTS IN SIMINTECH

V. V. Ustimenko, L. A. Mikhaylenko

Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: zeya1998@mail.ru

*Paper is devote to results of the development of the thermal vacuum tests computer model in the SimInTech environment of the technical systems dynamic modeling. Also results of adequacy check to the developed model are presented.*

*Keywords: vacuum camera, thermal vacuum tests, dynamic modeling, SimInTech.*

В настоящий момент исследования космического околоземного пространства предъявляют новые требования к уровню автоматизации процессов исследований и обеспечения лабораторий современными установками для проведения термовакuumных испытаний.

Испытания такого рода являются довольно трудоемким процессом, поэтому, многие прибегают к помощи компьютерного моделирования, особенно при реализации проектной части. Одним из основных средств на данном этапе, упрощающий процесс разработки и испытаний различных комплексных систем, является среда визуального моделирования SimInTech [1; 2], обеспечивающая:

- создание моделей технических устройств в виде структурных блок-схем;
- математическое моделирование их режимов на основе дифференциальных уравнений;
- интеграцию в единую комплексную модель;

Одна из ведущих особенностей SimInTech – применение «Базы данных сигналов» – структурированного списка переменных, обеспечивающих обмен расчетными значениями между расчетными схемами в единой модели [3; 4].

Модель термовакuumных испытаний в среде SimInTech состоит из двух моделей, связанных между собой через базу данных: термовакuumной камеры и системы управления термовакuumными испытаниями. Термовакuumная камера в свою очередь включает в

себе две подсубмодели: управление давлением в ТВК и управление температурой в ТВК (рис. 1).

Сигналы, поступающие в модель процесса управления давлением/ температурой (рис. 2) из встроенной БД, обрабатываются субмоделью и сохраняются. Полученный результат выводится на экран в виде графика.



Рис. 1. Схема управления ТВК в среде для динамического моделирования SimInTech

В модель процесса управления давлением поступает сигнал о состоянии двери [5]. В случае закрытия двери объемный насос (насос № 1) начинает откачивать воздух до необходимого уровня. Затем молекулярный насос (насос № 2) откачивает оставшийся воздух, обеспечивая герметичность объекта. Изначально температура в ТВК равна температуре окружающей среды. Поэтому после достижения уровня вакуума, воздух внутри ТВК начнет нагрев объекта испытания до необходимой температуры.

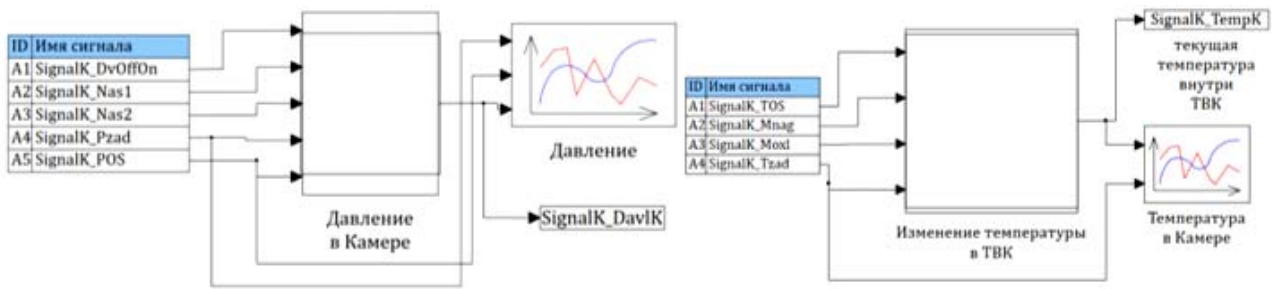


Рис. 2. Модели процесса управления давлением и температурой в ТВК в среде SimInTech

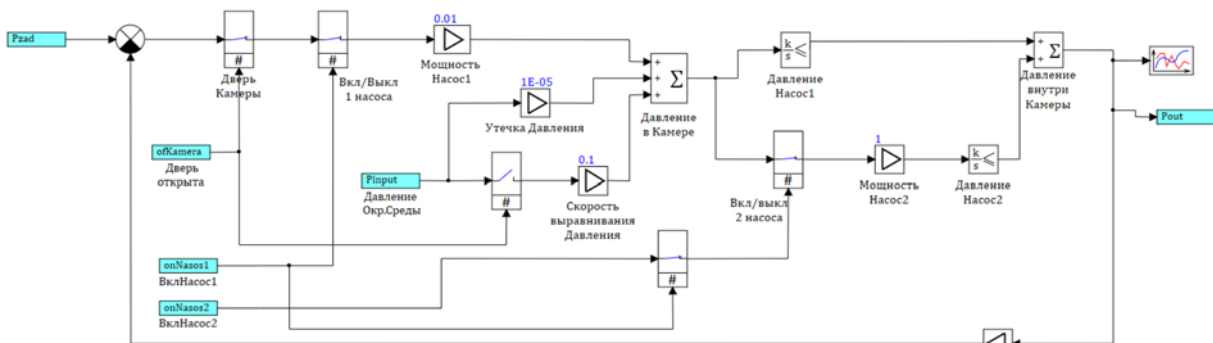


Рис. 3. Субмодель реализации алгоритма давления в ТВК в среде моделирования SimInTech

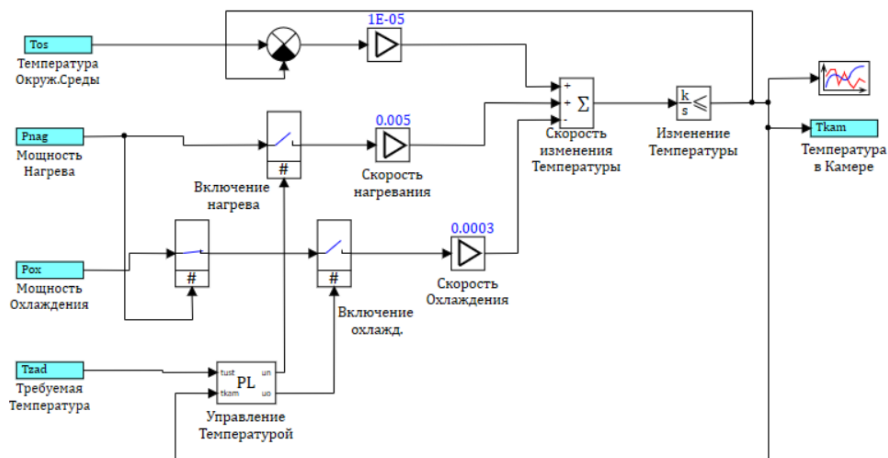


Рис. 4. Субмодель реализации алгоритма температуры в ТВК в среде моделирования SimInTech

Таким образом, разработанная на основе типовых блоков SimInTech модель термовакuumных испытаний позволяет контролировать программы испытаний. Компьютерная модель также дает возможность выявить наиболее неблагоприятные ситуации, которые могут возникнуть процессе функционирования термовакuumной камеры, и может быть использована для исследования поведения контролируемых параметров термовакuumных испытаний и отработки алгоритмов управления.

#### Библиографические ссылки

1. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech / Б. А. Карташов, О. С. Козлов, Е. А. Шабаев и др. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.
2. Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем / О. С. Козлов, Д. Е. Кондаков, Л. М. Скворцов и др. // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 20–25.
3. Система контроля безопасности транспортного контейнера / И. Н. Пожаркова, А. В. Чубарь, О. И. Киселев и др. // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 3. С. 23–32 [Электронный ресурс]. URL: [http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v3/N10\\_23-32.pdf](http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v3/N10_23-32.pdf) (дата обращения: 03.09.2019).
4. Моделирование технологического процесса в среде визуального моделирования SimInTech [Электронный ресурс] / И. Н. Пожаркова, А. В. Чубарь, И. А. Грищенко и др. // Сибирский пожарно-

спасательный вестник. 2018. № 2. С. 29–37. URL: [http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v2/N9\\_29-37.pdf](http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v2/N9_29-37.pdf) (дата обращения 03.09.2019).

5. Иванов А. И. Замкнутый космос на производстве // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 6. С. 36–39.

#### References

1. Kartashov B. A., Kozlov O. S., Shabaev E. A., Shchekaturov A. M. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech. [SimInTech environment of the technical systems dynamic modeling]. DMK Press, 2017. 424 p.

2. Kozlov O. S., Kondakov D. E., Skvorcov L. M. [Software package for the study of dynamics and design of technical systems]. Informacionnye tehnologii. 2005. № 9. P. 20–25 (In Russ.).

3. Pozharkova I. N., Chubar A. V., Kiselev O. I. [Container Security Monitoring System] [Electronic resource]. Sibirskij pozharno-spatatel'nyj vestnik. 2018. № 3. P. 23–32 (In Russ.). Available at: [http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v3/N10\\_23-32.pdf](http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v3/N10_23-32.pdf) (accessed: 03.09.2019).

4. Pozharkova I. N., Chubar A. V., Grishhenko I. A. [Simulation of technological procedures in a SimInTech Visual Simulation Environment] [Electronic resource]. Sibirskij pozharno-spatatel'nyj vestnik. 2018. № 2. P. 29–37 (In Russ.). Available at: [http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v2/N9\\_29-37.pdf](http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2018/v2/N9_29-37.pdf) (accessed: 03.09.2019).

5. Ivanov A. I. [Closed space in production]. Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti. 2011. № 6. P. 36–39 (In Russ.).

© Устименко В. В., Михайленко Л. А., 2019

## АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

И. В. Фролова<sup>1</sup>, Н. А. Шпет<sup>1</sup>, А. И. Солдатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственный центр «Полус»

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова 56б

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

E-mail: Frolova\_IrenV@mail.ru

*Важным фактором, влияющим на долговечность космических аппаратов, является уровень технологии и культуры производства. Исходя из этого весьма актуальна оценка качества изделий ракетно-космической отрасли с использованием фазированных антенных решеток.*

*Ключевые слова: фазированные антенные решетки, алгоритмы полной фокусировки, общего источника и синтезированной апертуры.*

## DATA PROCESSING ALGORITHMS USING PHASED ANTENNA ARRAYS

I. V. Frolova<sup>1</sup>, N. A. Shpet<sup>1</sup>, A. I. Soldatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “Scientific and Production Center”

56b, Kirova Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

40, Lenina Av., 634050, Tomsk, Russian Federation

E-mail: Frolova\_IrenV@mail.ru

*The level of technology and the production process culture are an important factors affecting the service life of spacecraft. Therefore, an urgent task is to ensure the quality of products of the rocket and space industry by using phased array antennas.*

*Keywords: phased antenna arrays, total focusing method, common source method, synthetic aperture focusing technique.*

Анализ материалов крупнейших международных научных конференций и журналов в области неразрушающего контроля [1; 2] свидетельствует о значительном расширении круга задач ультразвуковой дефектоскопической аппаратуры с использованием фазированных антенных решеток. Перспективным направлением стало применение антенных решеток в промышленности для контроля и оценки качества выпускаемой продукции. Возможность программного управления ультразвуковым пучком под разными ракурсами обеспечивает наиболее достоверную информацию о размере, форме и координатах расположения дефектов.

Для получения четкого изображения внутренней структуры образца требуется фокусировка ультразвукового пучка в каждой точке зоны контроля.

Фокусировку можно реализовать на этапе излучения, где применяются соответствующие законы задержки, чтобы каждый элемент излучал с некоторой задержкой, следовательно, максимальная концентрация пучка была направлена в сторону исследуемой точки. Также фокусировку можно реализовать синтетически путем сдвига и отбора  $A$ -сканов на этапе постобработки.

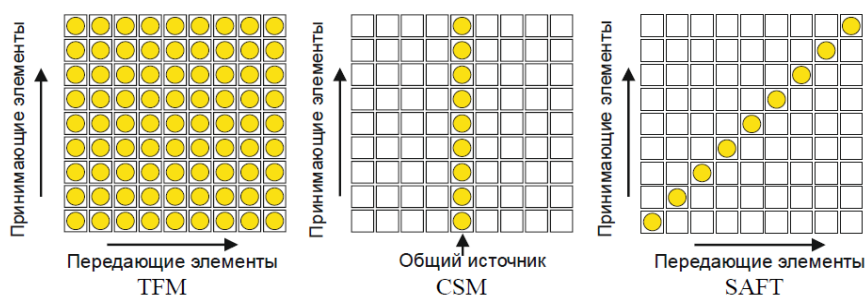
На сегодняшний день существует несколько алгоритмов обработки данных с использованием фазированных антенных решеток для обнаружения и оценки некачественной продукции в промышленности. Рассмотрим особенности каждого из них.

Так, в сейсморазведке широко известен алгоритм полной фокусировки (Total focusing method – TFM) с использованием полного набора данных решетки. Для реализации данного алгоритма требуется полный набор данных во временной области из любой возможной комбинации излучатель – приемник акустической решетки и вычисление амплитуды сигнала в каждой точке зоны контроля путем суммирования амплитуд сдвинутых  $A$ -сканов во времени, что позволяет провести фокусировку на этапе постобработки.

Пусть имеется линейная решетка из  $n_e$  элементов. Каждый элемент излучает один за другим, а все элементы антенной решетки принимают сигнал одновременно и независимо один от другого. Полученный набор данных образует матрицу излучатель – приемник размером

$$[n_e \times n_e \times n_s],$$

где  $n_s$  – количество временных отсчетов в каждом сигнале.



Алгоритмы восстановления изображения

Удобно представить данные в виде матрицы  $A_{ij}(t)$  при  $1 \leq i \leq n_e, 1 \leq j \leq n_e$ :

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} \dots & A_{nn} \end{pmatrix},$$

где  $A_{ij}$  –  $A$ -скан, полученный  $i$ -м приемником при излучении  $j$ -м излучателем.

Законы задержки избирательны для каждой точки зоны контроля. Матрица расстояний  $D_{jkl}$  от каждой точки зоны контроля до приемника будет иметь размерность  $n_x \times n_y \times n_e$ , а матрица расстояний  $D_{ikl}$  от излучателя до каждой точки контроля будет иметь такую же размерность, где  $x, y$  – координаты точки фокусировки.

Матрица изображений  $I_{kl}$ , в каждой точке зоны контроля определяется по следующей формуле:

$$I_{kl} = \left| \sum_i \sum_j A_{ij} (D_{ikl} + D_{jkl}) \right|.$$

Существует алгоритм общего источника (Common Source Method – CSM), где излучатель является общим для всех приемников. Тогда формула для матрицы изображений примет следующий вид:

$$I_{kl} = \left| \sum_j A_j (D_{kl} + D_{jkl}) \right|,$$

где  $j$  – номер принимающего элемента;  $D_{kl}$  указывает на закон задержки общего источника, который зависит от расположения точки изображения.

Еще один алгоритм – синтезированной апертуры, по-другому известный как метод обратного рассеивания (Synthetic Aperture Focusing Technique – SAFT), широко используемый в радиолокации. Данный алгоритм заключается в том, что элемент, который излучает, также и принимает. Таким образом, выражение, определяющее матрицу изображений для алгоритма SAFT, можно записать в следующем виде:

$$I_{kl} = \left| \sum_j 2A_j (D_{jkl}) \right|,$$

где  $j$  – номер излучающего и принимающего элемента.

Все три алгоритма отличаются только комбинациями излучатель – приемник, как показано на рисунке. Алгоритмы CSM и SAFT требуют  $n_e$  вычислений и способны восстановить изображение за более короткий период времени, чем алгоритм TFM, для которого

требуется  $n_e^2$  вычислений. За один цикл CSM имеет меньшее время восстановления, чем SAFT и TFM, где требуется  $n_e$  циклов.

Теоретически чувствительность изображения SAFT и CSM ниже, чем у TFM [3], потому что требуется меньшее количество данных, тем самым снижается отношение сигнал/ шум.

Таким образом, с использование алгоритма TFM наиболее перспективно для контроля ответственных изделий, применяемых в ракетно-космической отрасли. Зондирование под разными ракурсами позволяет увеличить разрешающую способность, чувствительность, отношение сигнал/шум и обнаружить дефекты, находящиеся в акустической тени других дефектов, что способствует повышению надежности техники и увеличению срока службы космического аппарата.

#### Библиографические ссылки

1. Солдатов А. И., Борталевич С. И., Шульгина Ю. В. Система управления построением изображения с фазированной антенной решеткой при обработке данных в режиме реального времени // Евразийская экономическая интеграция как фактор повышения стабильного и поступательного развития национальных хозяйственных систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф. М. : ИПР РАН, 2016. С. 220–221.
2. Особенности ультразвуковой 3D-визуализации в современных средствах контроля / И. О. Болотина [и др.] // Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 154–157.
3. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов : справочник. М. : Металлургия, 1991. 752 с.

#### References

1. Soldatov A. I., Bortalevich S. I., Shulgina Yu. V. Phased array image control system for real-time data processing // Materials of the international scientific and practical conference. 2016. P. 220–221.
2. Bolotina I. O., Kvasnikov K. G., Makarov V. S., Soldatov A. I. The features of ultrasound 3d-imaging in the modern means of control. Control. Diagnostics. 2013. № 13. P. 154–157.
3. Krautkremer Y., Krautkremer G. Ultrasound testing of materials: Handbook. Moscow, Metallurgy, 1991. 752 p.

© Фролова И. В., Шпет Н. А., Солдатов А. И., 2019



УДК 681.3

## КОНТРОЛЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АТТЕСТАЦИИ ПРОБОЙНОЙ УСТАНОВКИ

Д. А. Шабалина, Е. А. Жирнова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: dasha\_sama@mail.ru

*Рассмотрена структурная схема пробойной установки, определены требования к метрологическим характеристикам, предложен алгоритм первичной аттестации испытательного оборудования.*

*Ключевые слова: испытательное оборудование, аттестация, метрологические характеристики.*

## CONTROL OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS AT CERTIFICATION OF BREAKDOWN INSTALLATION

D. A. Shabalina, E. A. Zirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dasha\_sama@mail.ru

*The structural diagram of the breakdown installation is considered, the requirements for metrological characteristics are determined, the algorithm of primary certification of testing equipment is proposed.*

*Keywords: test equipment, certification, metrological characteristics.*

Установка пробойная универсальная УПУ-6 предназначена для испытания изоляции электротехнического оборудования и материалов переменным синусоидальным напряжением частотой 50 Гц и выпрямленным напряжением отрицательной полярности, регулируемым в пределах 0–6 кВ с выходным током до 100 мА по ГОСТ 6433.3–71 [1]. Структурная схема пробойной установки представлена ниже на рисунке.

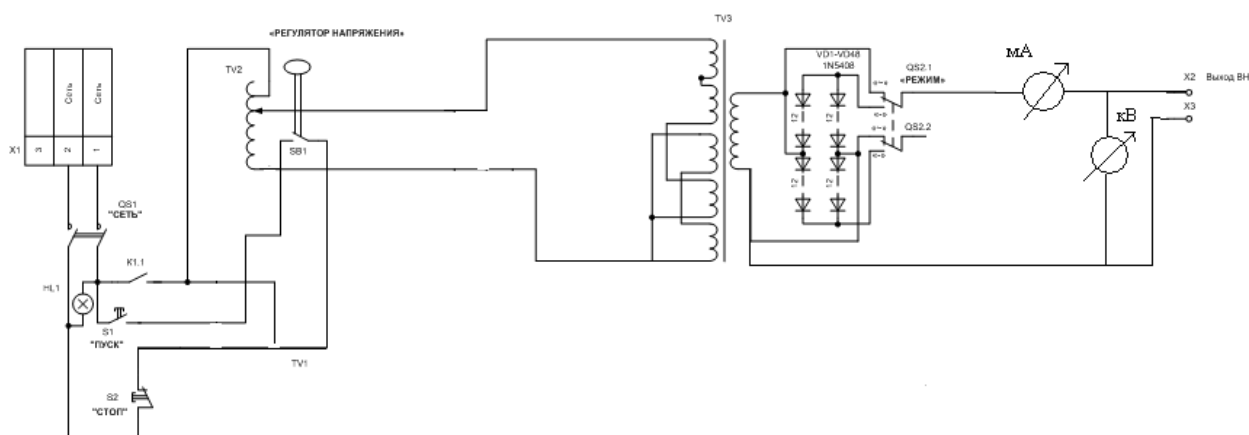
Сопротивление изоляции является основным показателем состояния изоляции и его измерение является неотъемлемой частью испытаний всех видов электрооборудования и электрических цепей.

Аттестация испытательного оборудования – это определение нормированных точностных характеристик испытательного оборудования, их соответствия

требованиям нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к эксплуатации [2; 3]. Первичная аттестация испытательного оборудования проводится при вводе в эксплуатацию.

Установление требований к метрологическим характеристикам измеряемых параметров является основным требованием при разработке методики и программы аттестации испытательного оборудования.

Измерения величин тока и напряжения на промышленных предприятиях обеспечивают контроль технологического процесса основных агрегатов, установленного режима работы, состояния изоляции в сетях с изолированной нейтралью трехфазного тока [4; 5].



Структурная схема пробойной установки УПУ-6

Таблица 1

## Операции и приборы контроля метрологических параметров пробойной установки УПУ-6

№ операции	Название операции	Приборы/ методы
001	Проверка киловольтметра установки 0,1–10 кВ	С196, С502, КТ 0,5–1,5 Конденсатор емкостью не менее 0,025 мкФ
002	Проверка миллиамперметра установки 0,1–100 мА	Миллиамперметр постоянного тока, с пределом измерения 100 мА, КТ 0,5–1
003	Контроль и регулировка срабатывания защиты 120 мА	Миллиамперметр переменного тока КТ 0,5–2,5

Таблица 2

## Операции, выполняемые при аттестации пробойной установки УПУ-6

Наименование операции	Обязательность при проведении первичной аттестации
1. Проверка комплектности технической документации к ИО	+
2. Внешний осмотр	+
3. Измерение сопротивления изоляции	+
4. Опробование и проверка действия блокировочных и заземляющих устройств, средств сигнализации и других элементов	+
5. Проверка наличия отметки о поверке средств измерений	+
6. Определение диапазона и погрешности измерения испытательного выпрямленного напряжения	+
7. Определение коэффициента пульсации выпрямленного напряжения	+
8. Определение диапазона и погрешности измерения испытательного напряжения промышленной частоты	+
9. Определение коэффициента амплитуды испытательного напряжения	+
10. Определение коэффициента трансформации	+
11. Определение частоты основной гармоники испытательного напряжения	+
12. Определение погрешности измерителя тока проводимости (тока утечки) разрядников	+
13. Определение соответствия параметров ИО требованиям ЭД при крайних значениях питающего напряжения	+
14. Определение соответствия параметров ИО требованиям ЭД при крайних значениях рабочих температур.	+

Основные параметры установки, подлежащие контролю, регулировке и периодической проверке – это напряжение встроенного киловольтметра, ток миллиамперметра установки, а также ток срабатывания защиты.

Технологический процесс измерения и контроля метрологических параметров установки пробойной УПУ-6 представлен в табл. 1.

Исходя из контролируемых параметров, определяем основные операции, проводимые при аттестации установки пробойной УПУ-6 в качестве испытательного оборудования. Перечень данных операций приведен в табл. 2.

Таким образом, если результаты аттестации подтверждают, что контролируемые параметры испытательной установки соответствуют установленным метрологическим характеристикам, то пробойная установка пригодна в качестве испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции.

## Библиографические ссылки

1. Установка пробойная универсальная. Руководство по эксплуатации. УПУ-6/07.00.00.00РЭ.

2. Петров В. Н. Аттестация испытательного оборудования. Новосибирск, 2014.

3. ГОСТ Р 8.568–2017. ГСОЕИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2017.

4. Ивасев С. С., Раводина Д. В. Методы контроля и испытания изделий. Красноярск, 2015.

5. Захарова Н. В., Кривина Т. Е. Методы и средства измерений и контроля. Красноярск, 2017.

## References

1. Ustanovka proboynaya universal'naya. Rukovodstvo po ekspluatatsii. UPU-6/07.00.00.00R-E.

2. Petrov V. N. Attestatsiya ispytatel'nogo oborudovaniya. Novosibirsk, 2014.

3. GOST R 8.568–2017. GSOEI. Attestatsiya ispytatel'nogo oborudovaniya. Osnovnyye polozheniya. Moscow, Standartinform, 2017.

4. Ivasev S. S., Ravodina D. V. Metody kontrolya i ispytaniya izdeliy. Krasnoyarsk, 2015.

5. Zakharova N. V., Krevina T. E. Metody i sredstva izmereniy i kontrolya. Krasnoyarsk, 2017.

© Шабалина Д. А., Жирнова Е. А., 2019

УДК 62-503.55

## РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕРКИ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ РАСХОДА РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Д. А. Шуринова, А. Г. Суворов, А. Н. Коваленко, А. В. Мурыгин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [dasha.shurinova@yandex.ru](mailto:dasha.shurinova@yandex.ru)

*Для проверки точности калибровки расходомеров ракетного топлива необходимо разработать специальный испытательный стенд. Характеристики стенда должны отличаться от стандартных испытаний расходомеров и учитывать все особенности эксплуатации данного измерительного прибора.*

*Ключевые слова: датчик расхода ракетного топлива, проверка точности калибровки, испытательный стенд.*

## DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR CHECKING THE CALIBRATION OF ROCKET FUEL SENSORS

D. A. Shurinova, A. G. Suvorov, A. N. Kovalenko, A. V. Myrugin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: [dasha.shurinova@yandex.ru](mailto:dasha.shurinova@yandex.ru)

*To verify the accuracy of calibration of rocket fuel flow meters, it is necessary to develop a special test bench. The stand should be able to take account of all particular qualities of usage and differ from standard tests of flow meters.*

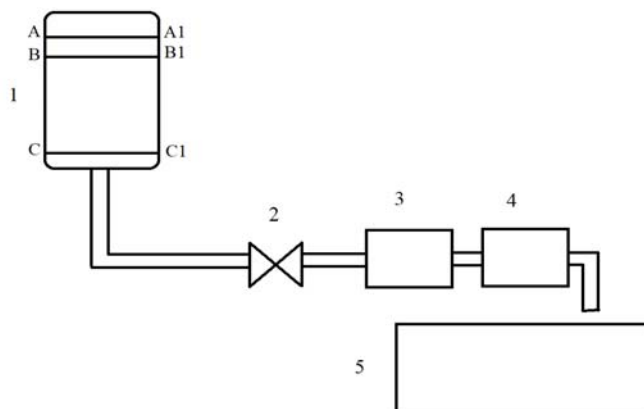
*Keywords: rocket fuel flow meters, calibration accuracy check test bench.*

Для проверки корректности калибровки обычных датчиков расходов их помещают в стандартную установку, состоящую из прямых труб, в которую вмонтирован проверенный расходомер высокой точности [1]. После пропускания определённого количества продукта через установку показатели испытываемого датчика сверяются с эталонными, по результатам оценивается корректность калибровки проверяемого датчика [2].

Для использования в ракетно-космической области стандартный способ проверки точности расходомера является неприемлемым, так как он не воспроиз-

водит всех особенностей конструкции системы, в которой он будет расположен, что может негативно сказаться на точности проверки [3]. При расчёте расхода топлива в полёте расходомер должен безошибочно показывать расход. Недопустимо пренебречь особенностями строения системы, которые могут повлиять на показания прибора.

Для решения данной задачи было решено проводить испытания датчиков в максимально приближенных к реальным условиям [4]. Был собран следующий испытательный стенд (см. рисунок).



Модель испытательного стенда расходомеров:

1 – резервуар с топливом; 2 – задвижка; 3 – точно откалиброванный расходомер;  
4 – проверяемый на точность расходомер; 5 – резервуар для стока топлива, используемого при проверке

При пропуске топлива через расходомеры пустые пространства в баке заполняются азотом для предотвращения возгорания [5].

Прогон топлива должен осуществляться при определённой скорости (т. е. расход топлива определён и регулируется давлением азота в резервуаре). Показания с датчиков приходят на видеографический регистратор ЭлМетро-ВиЭР-104 [6].

Измерения происходят когда уровень топлива в баке находится между уровнями ВВ1 и СС1, чтобы форма резервуара никак не могла повлиять на расход.

#### References

1. URL: <https://rnsinfo.ru/materials/articles/monitoring/2515/> (data obrashcheniya: 04.07.2019).
2. URL: <https://www.denso-am.ru/produkty/zapasnyechasti/sistemy-upravleniia-dvigatелеm/dat-shiki-massovogo-raskhoda-vozdukha/printsip-raboty/> (data obrashcheniya: 05.07.2019).
3. URL: <https://findpatent.ru/patent/215/2151718.html> (data obrashcheniya: 07.07.2019).
4. URL: <https://www.gidroprivod.ru/services/razrabotka-i-izgotovlenie-ispytatelnykh-stendov/> (data obrashcheniya: 08.07.2019).
5. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32430362> (data obrashcheniya: 08.07.2019).
6. URL: [https://www.elmetro.ru/net-sat\\_files/userfiles/ViER/Rukovodstvo\\_ekspluatatsii\\_ViER\\_104K\\_v.37.pdf](https://www.elmetro.ru/net-sat_files/userfiles/ViER/Rukovodstvo_ekspluatatsii_ViER_104K_v.37.pdf) (data obrashcheniya: 08.07.2019).

© Шуринова Д. А., Суворов А. Г., Коваленко А. Н.,  
Мурыгин А. В., 2019



**Секция**

**«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
И УПРАВЛЕНИЕ»**

УДК.621.398 + 621.376.9

## РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КИС ДЛЯ МАЛОГО КА СТАНДАРТА CCSDS

А. В. Байтеряков<sup>1\*</sup>, Н. С. Шатеркин<sup>1</sup>, В. В. Матвеев<sup>1</sup>, А. Р. Садыков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «ИРЗ-Связь», г. Ижевск  
Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Базисная, 19  
\*E-mail: email1990@yandex.ru

*Представлены результаты работ по разработке аппаратуры перспективной КИС для малых космических аппаратов стандарта CCSDS. Описаны основные принципы проектирования.*

*Ключевые слова: бортовая аппаратура командно-измерительной системы, малый космический аппарат, интерфейсный модуль, приемопередающее устройство, спутниковая связь, CCSDS, командно-программная информация, телеметрическая информация.*

## DEVELOPMENT OF ADVANCED COMMAND-MEASURING SYSTEM EQUIPMENT FOR SMALL SPACECRAFT OF CCSDS STANDARD

A. V. Baiteryakov<sup>1\*</sup>, N. S. Shaterkin<sup>1</sup>, V. V. Matveev<sup>1</sup>, A. R. Sadykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Limited Liability Company "IRZ-Svyaz"  
19, Bazisnaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation  
\*E-mail: email1990@yandex.ru

*Results of development of advanced command-measuring system equipment for small spacecrafts of CCSDS standard are presented. The basic principles of designing are described.*

*Keywords: command-measuring system onboard equipment, small spacecraft interface module, receiver-transmitter device, space communication, CCSDS, command-program information, telemetry information.*

В последнее время определенную популярность приобрела платформа малых космических аппаратов (КА), которые применяются для исследования систем связи, дистанционного зондирования Земли и калибровки радиолокационных станций и оптических систем контроля космического пространства, а также в образовательных целях [1]. Такие аппараты характеризуются малыми массогабаритными характеристиками, коротким сроком активного существования и малой ценой. Как следствие, аппаратура для таких КА должна соответствовать вышеперечисленным требованиям. Это касается и такой значимой части аппаратуры КА, как командно-измерительная система (КИС).

КИС также должен соответствовать определенным протоколам для систем командного управления, для возможности его применения в составе других систем. В России в основном это ведомственные стандарты закрытого формата. Но существуют также открытые рекомендованные международные стандарты, например, рекомендации по стандартизации Международного Консультативного Комитета по космическим системам передачи данных (Consultative Committee for Space Data Systems – CCSDS), включая стандарты Европейского космического агентства [2; 3]. Поэтому создание и разработка аппаратуры КИС, соответствующей международным стандартам

CCSDS, является перспективной и актуальной задачей, обеспечивающей универсальность аппаратной части системы.

АО «Ижевский радиозавод» в инициативном порядке разрабатывает малогабаритную бортовую аппаратуру КИС по исходным данным АО «ИСС» для организации командной радиолинии стандарта CCSDS.

Функционально КИС выполняет следующие задачи:

- прием командно-программной информации с наземной станции, ее декодирование и передача в бортовой комплекс управления (БКУ);
  - передача телеметрической и служебной информации с корабля на наземную станцию;
  - измерение траекторных параметров орбиты космического аппарата.
- Структурно КИС состоит из следующих функциональных блоков и модулей:
- антенно-фидерное устройство (АФУ);
  - модуль фильтров;
  - блок приемно-передающего устройства (ППУ);
  - модуль обработки данных;
  - модуль усилителя мощности;
  - вторичный источник питания.

В работе рассматривается разработка составной части КИС без АФУ.

## Параметры составной части КИС

Параметр	Значение
Запросный канал в соответствии с ECSS-E-ST-50-05C	
Частотный диапазон	2098,5–2108,8 МГц
Модуляция	фазовая модуляция с индексом 0,1–1,4 рад
Скорость передачи	16 кбит/с
Чувствительность приемника	не более –140 дБВт
Формат КПИ	ECSS-E-ST-50-04C
Ответный канал в соответствии с ECSS-E-ST-50-05C	
Частотный диапазон	2279–2290 МГц
Модуляция	КИМ-ФМн-ФМ
Скорость передачи	8, 16, 32, 75, 150, 300, 600 кбит/с
Выходная мощность передатчиков	не менее 2 Вт
Формат ТЛМ	ECSS-E-ST-50-03C
Траекторные измерения по ECSS-E-ST-50-02C	
Отношение частот запросного и ответного канала	221/240
Погрешность измерения дальности	не более ±20 м
Другие параметры	
Интерфейс обмена со смежной аппаратурой изделия	RS422 (2 изолированных дуплексных канала)
Количество выдаваемых импульсных команд	16
Количество принимаемых импульсных команд	6
Диапазон рабочих напряжений	23–34 В
Потребляемая мощность	в дежурном режиме не более 7 Вт в сеансном режиме не более 20 Вт
Расположение в КА	негерметичный отсек
Резервирование	двукратное
САС	3 года
Масса с учетом резервирования	не более 800 г
Габаритные размеры с учетом резервирования	140×100×62

Модуль фильтров обеспечивает развязку между приемными и передающими трактами КИС.

Приемная часть ППУ реализована на базе архитектуры с прямым преобразованием. Приемный тракт включает в себя перестраиваемые малошумящие усилители, смесители, усилители квадратурных сигналов, аналоговые фильтры, 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь.

Передающая часть ППУ реализована по схеме с квадратурной модуляцией несущей частоты. Квадратурные цифровые отчеты поступают из блока цифровой обработки модуля обработки данных на 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь.

Аналоговые квадратурные сигналы с выхода цифро-аналогового преобразователя подаются на смеситель.

Модуль цифровой обработки выполняет следующие основные функции:

- прием сигнала промежуточной частоты и решение задач поиска, захвата, удержания, демодулирования сигнала и выделения информации;
- выдача принятой информации в модуль обработки данных;
- прием от модуля обработки данных кадра телеметрической информации и его преобразование для

передачи по ответному каналу командной радиолинии;

- управление режимами КИС по внешним командам.

Задачи в модуле цифровой обработки решаются с помощью современных алгоритмов цифровой обработки сигналов, которые реализованы в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Модуль обработки данных предназначен для декодирования пакета телекоманд (в соответствии со стандартом PSS-04-107 [4]) и формирования телеметрического кадра в пакетную телеметрию (в соответствии со стандартом PSS-04-106 [5]).

Основные параметры составной части КИС приведены в таблице.

Для существенного снижения массогабаритных характеристик и стоимости КИС применены электро-радиоизделия (ЭРИ) высокой интеграции уровня Industrial. Применение импортных ЭРИ производится в соответствии с требованиями РЭК05.002–2015. При выборе компонентной базы предполагается учитывать возможность производителей сохранять производство ЭРИ в течение более 10 лет.

Составная часть КИС выполнена в виде двух герметичных малогабаритных моноблоков и предназна-

чена для установки в негерметичном отсеке космического аппарата.

#### Библиографические ссылки

1. Грошев В. Я., Грошев С. В. Малогабаритные космические аппараты дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/pres2006/groshev.pdf> (дата обращения: 30.08.2019).
2. ECSS-E-ST-50-05C Rev. 2 Radio Frequency and Modulation, ESA-ESTEC, 4 October 2011.
3. ECSS-E-ST-50-02C Ranging and Doppler tracking, ESA-ESTEC, 31 July 2008.
4. ESA PSS-04-107, Issue 2 Packet Telecommand Standard, April 1992.
5. ESA PSS-04-106, Issue 1 Packet Telemetry Standard, January 1988.

#### References

1. Groshev V. Y., Groshev S. V. Malo-gabaritnye kosmicheskie apparaty distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Space Research Institute] (In Russ.). [Electronic resource]. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/pres2006/groshev.pdf> (accessed: 30.08.2019).
2. ECSS-E-ST-50-05C Rev. 2 Radio Frequency and Modulation, ESA-ESTEC, 4 October 2011.
3. ECSS-E-ST-50-02C Ranging and Doppler tracking, ESA-ESTEC, 31 July 2008.
4. ESA PSS-04-107, Issue 2 Packet Telecommand Standard, April 1992.
5. ESA PSS-04-106, Issue 1 Packet Telemetry Standard, January 1988.

© Байтеряков А. В., Шатеркин Н. С.,  
Матвеев В. В., Садыков А. Р., 2019



УДК 629.7.036.74

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. А. Карягин, Е. П. Олейников

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

*Основной целью проводимой работы является создание комплексной системы, обеспечивающей всепогодную круглосуточную навигацию и автоматическое управление, в том числе посадку, беспилотного летательного аппарата.*

*Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, микроэлектромеханический гироскоп, контрольно-диспетчерский пункт.*

## AUTOMATIC LANDING SYSTEM UNMANNED AERIAL VEHICLES

A. A. Karyagin, E. P. Oleynikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: shura.karyagin@mail.ru

*The main goal of the work is the creation of an integrated system that provides all-weather all-day navigation and automatic control, including landing, of an unmanned aerial vehicle.*

*Keywords: strapdown inertial navigation system, microelectromechanical gyroscope, control room.*

**Введение.** Системы автоматической посадки предназначены для обеспечения посадки БЛА в простых и сложных метеорологических условиях днем и ночью без участия человека. От успешного решения этой важнейшей задачи во многом зависит эффективность применения современной авиации [1].

**Система автоматической посадки.** Основу навигационного блока системы автоматической посадки составляют радиотехническая система локальной навигации и бесплатформенная инерциальная навигационная система. Радиотехническая система локальной навигации состоит из бортового и наземного сегментов оборудования.

Бортовая часть включает в себя радиомодуль-запросчик с антенной, к наземной части относятся переносные опорные навигационные устройства, в состав каждого из которых входят радиомодуль-ответчик и антенна [2]. Бесплатформенная инерциальная навигационная система построена на микроэлектромеханических гироскопах и акселерометрах, которые являются «грубыми» датчиками, в результате чего навигационные параметры и параметры ориентации, получаемые от системы, имеют существенные погрешности.

Коррекция информации бесплатформенной инерциальной навигационной системы осуществляется на основании измерений радиотехнической системы локальной навигации в блоке комплексирования. Кроме того, предусмотрен режим коррекции

бесплатформенной инерциальной навигационной системы от системы воздушных сигналов [3].

Комплексная навигационная система обеспечивает определение координат местоположения ЛА с высокой точностью и надежностью, необходимой в том числе при заходе на посадку и посадке беспилотных летательных аппаратов [4].

Полученные навигационным блоком параметры движения объекта передаются в блок управления, который, в свою очередь, формирует управляющие законы для аэродинамических рулей и силовой установки согласно выбранному режиму. Возможно переключение между автоматическим, полуавтоматическим и ручным режимами управления. Кроме того, предусмотрен контрольно-диспетчерский пункт, который предназначен для отображения информации телеметрии, контроля за состоянием систем беспилотного летательного аппарата, передачи полетного задания и изменения режимов управления дистанционно, а также для организации резервного канала ручного управления [5].

### Библиографические ссылки

1. Зоншайн С. И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов. М. : Высш. шк., 2010. 364 с.
2. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева и др. М. : Государственное научно-техническое изд-во, 2012. 430 с.

3. Петров К. П. Аэродинамика элементов летательных аппаратов. М. : Ё. Ё. Медиа, 2013. 255 с.

4. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика летательных аппаратов. М. : Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 2010. 352 с.

5. Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. (ред.) Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий.

#### **References**

1. Zonshayn S. I. Aerodynamics and aircraft design. Moscow, Higher School, 2010. 364 с.

2. Flight dynamics. Trajectories of aircraft / I. V. Ostoslavsky, I. V. Strazheva et al. Moscow, Oborongiz, State Scientific and Technical Publishing House, 2012. 430 с.

3. Petrov K. P. Aerodynamics of the elements of aircraft. Moscow, YOE Media, 2013. 255 p.

4. Sikharulidze Yu. G. Ballistics of aircraft. Moscow, The main edition of the physical and mathematical literature of the Nauka publishing house, 2010. 352 p.

5. Krasilshchikov M. N., Sebryakov G. G. (Ed.) Control and guidance of unmanned maneuverable aircraft based on modern information technologies.

© Карягин А. А., Олейников Е. П., 2019

УДК 629.7.01

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. В. Миленин\*, Е. П. Олейников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: Infosec@mail.ru

*Представлено современное состояние и перспективы развития малых космических аппаратов.*

*Ключевые слова: малые космические аппараты, спутниковые системы.*

## CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SMALL SPACECRAFT

D. V. Milenin\*, E. P. Oleynikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: Infosec@mail.ru

*The current state and development prospects of small spacecraft are presented.*

*Keywords: small spacecraft, satellite systems.*

В настоящее время люди проявляют большой интерес к малым космическим аппаратам, в основном этот интерес связан с возможностью снижения стоимости запуска за счёт использования конверсионных баллистических ракет. К началу 2010 года тенденция к миниатюризации бортовых систем и расширения круга участников космической деятельности привела к резкому росту популярности малых спутников.

Малые космические аппараты классифицируются по следующим признакам: по назначению полезной нагрузки; по цели запуска; по национальной принадлежности; по способу вывода; по времени активного существования.

Следует отметить, что существует различные трактовки градации спутников по массе, в том числе, с учетом энергопотребления и цены. Объем индустрии рынка только спутников, масса которых не превышает 100 килограмм, составляет почти 2 миллиарда долларов.

Современные МКА можно поделить на три группы:

1. Спутники массой 100 килограмм, решающие задачи «больших» спутников, к этой группе можно отнести такие спутники как: «Гонец-М», «Канопус», «Аист-2 Д».

2. Спутники в стандартном форм-факторе «Кубсат», а также несколько альтернативно заявляемых форм-факторов, например спутники «ТаблетСат», российской частной компании СПУТНИКС. Спутники «Кубсаты» – это самый популярный формат в спутникостроении в настоящее время.

3. Промежуточная группа – спутниковые системы более продвинутого технологического уровня, чем «Кубсат».

**Классы МКА**

Класс КА	Диапазон масс
Фемтоспутник	10–100
Пикоспутник	< 1 кг
Наноспутник	1–10 кг
Микроспутник	10–100 кг
Малые КА верхнего массового диапазона	100–500 кг

Миниатюризация бортовых систем, появление новых схемотехнических решений, что позволяет значительно снизить массу аппарата и решать проблемы, ранее решавшиеся «большими» КА. Малые спутники позволяют отрабатывать новые технологии и эффективно решать отдельные конкретные задачи. МА наименьшей массы, такие как, нано, позволяет реализовать космические программы университетов. Именно по этим основным аспектам МКА развиваются на данный момент.

Если бы малых космических аппаратов, в особенности микро- и нанокласса, не было – их бы следовало изобрести. Дело не в том, что весьма уважаемые гиганты инфокоммуникационного бизнеса вплотную приблизились к развертыванию серьезных многоспутниковых группировок – хотя и это очень важно. Развитие малых аппаратов резко снизило барьер входа на рынок космических средств, вначале – для университетов, а затем – для малого и венчурного бизнеса. Несомненно, такое снижение барьера – серьезный вызов и для правовых основ космической деятельности, и для обеспечения космической безопасности, борьбы с космическим мусором.

### Библиографические ссылки

1. Анпилогов В. Р. Малые спутники на ГСО. Обзор и анализ российских проектов [Электронный ресурс] // Технологии и средства связи. 2000. № 6. URL: [http://www.vsat-tel.ru/library/art\\_24.htm](http://www.vsat-tel.ru/library/art_24.htm) (дата обращения: 15.05.2019).
2. Малые спутники в сетях связи и вещания / А. Г. Ефремов, В. В. Витер и др. // Технологии и средства связи. 2000. № 1.
3. Рытенкова О. Развитие новых трендов в области фиксированной спутниковой связи // Технологии и средства связи. 2015. № 3. С. 52–62.
4. Малые спутники – кто они / М. Ю. Овчинников // (под названием «Малые мира сего»). Компьютер. 2007. № 15.

### References

1. Anpilogov V. P. [Small satellites on GSO. Review and analysis of Russian projects] [Electronic resource] // Technologies and means of communication. 2000. № 6. URL: [http://www.vsat-tel.ru/library/art\\_24.htm](http://www.vsat-tel.ru/library/art_24.htm) (accessed: 15.05.2019).
2. Small satellites in communication and broadcasting networks / A. G. Efremov V. V. Viter et al. // Technologies and means of communication. 2000. № 1.
3. Rytenkova O. Development of new trends in the field of fixed satellite communications // Technologies and communications. 2015. № 3. P. 52–62.
4. Small satellites – who they are / M. Yu. Ovchinnikov (under the name “Small of this world” was published in Computer No. 15 2007).

© Миленин Д. В., Олейников Е. П., 2019

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ПРЕИМУЩЕСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Репин<sup>1\*</sup>, Е. П. Олейников<sup>2</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: padaz.repin.1999@mail.ru

*Ставится задача рассмотреть проблемы малых космических аппаратов (МКА). В результате анализа выявляются преимущества МКА перед более крупными космическими аппаратами, а также рассматривается их эксплуатация.*

*Ключевые слова: малый космический аппарат, система, спутник, МКА, технологии.*

## OPERATION AND ADVANTAGES OF SMALL SPACECRAFT

A. A. Repin<sup>1\*</sup>, E. P. Oleynikov<sup>2</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: padaz.repin.1999@mail.ru

*The article aims to consider the problems of small spacecraft (ICA). The analysis reveals the advantages of ICA over larger spacecraft and examines their operation.*

*Keywords: small spacecraft, system, satellite, ICA, technology.*

В мире высокого развития науки и технологий, где каждая разработка человечества открывает двери во что-то новое, уже никто не сомневается в том, что за развитием малых космических аппаратов (МКА) стоят перспективы развития уровня эффективности действий различных государственных служб.

В наши дни космонавтика развивается очень бурно и интенсивно. Отличительной чертой и бесспорным преимуществом, которые обладают искусственные спутники Земли, является высокий поток передачи данных и их обработка принимающими станциями.

По общепринятой классификации, космические аппараты делятся по своей массе на три группы: большие, средние и малые (рис. 1).



Рис. 1. Классификация космических аппаратов по массе

Разработка больших спутников, выводимых на высокие орбиты, требуют большей части финансирования, чем МКА, работающие на низких околоземных орбитах. Минимизация размеров позволяет уменьшить массу космических аппаратов и потребляемую мощность. Это открывает создание систем из спутни-

ков, количество которых может насчитываться десятками.

Такие системы наиболее эффективны в техническом и финансовом плане по сравнению с теми, в которых используются тяжелые спутники на высоких орбитах.

МКА имеют много преимуществ. Следует учесть, что они недорогие, податливы различным модификациям и усовершенствованиям для достижения результата в какой-либо поставленной задаче, а также создают минимум радиопомех, что улучшает точность передаваемой информации в несколько раз.

Использование МКА препятствует возникновению различных рисков, возникающих при запуске на орбиту и работой в космосе, минимизируя финансовые затраты в случае выхода из строя такого спутника. Утрата одного или нескольких малогабаритных спутников не приводит к полной потере работоспособности системы.

МКА используют для обработки данных и презентации технологий, например, для проведения испытаний узловых систем ракетно-космической техники, исследований в области солнечной радиации, космической физики, астрономии. Благодаря МКА возможно не только исследование границ атмосферы Земли, но и наблюдения земных процессов, изменяющихся на протяжении дня или недели (научный космический аппарат «Чибис»).

Связанный с военной тематикой МКА «ГасSat-3», модель которого была разработана в США, имеет гиперспектральную камеру высокого разрешения «Atremis» (рис. 2).

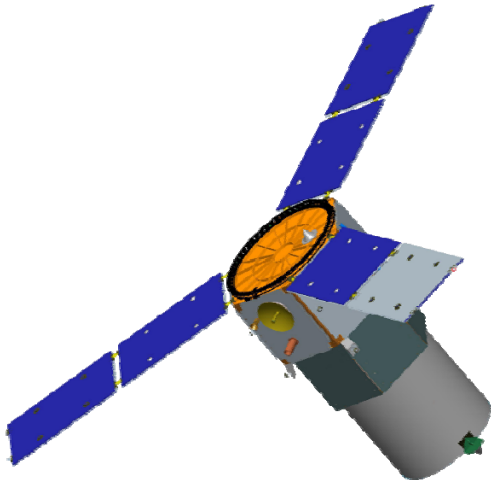


Рис. 2. Малый космический аппарат «TacSat-3»

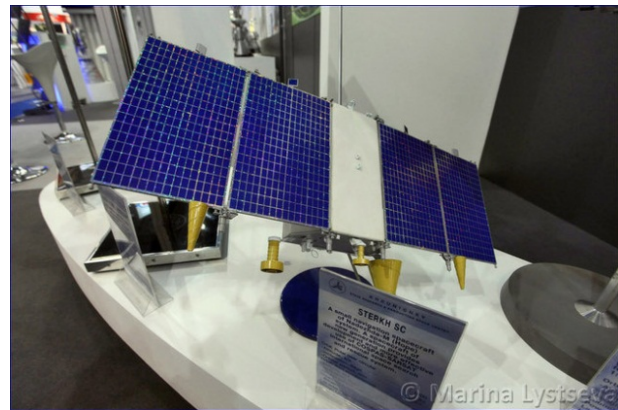


Рис. 3. Малый космический аппарат «Стерх»

Такой аппарат позволяет получать снимки в цвете, а также проводить спектральное профилирование отдельных изображений (или фрагментов) с высокой точностью, который дает возможность определить замаскированные угрозы в том или ином проявлении.

В России существует большое количество разработок малых космических аппаратов. Некоторые из них направлены исключительно на научные наблюдения, однако есть и такие, цель которых заключается в спасении жизни человека.

МКА «Стерх» является частью международной космической системы поиска аварийных судов (КОСПАС), потерпевших аварию в морских, воздушных и сухопутных объектах (рис. 3). Цель такого МКА заключается в приеме сигнала SOS от аварийно-спасательных радиомаяков, а также точного определения координат со среднеквадратичной ошибкой не более 20 километров.

Можно с уверенностью сказать, что дальнейшее развитие науки и технологий, связанных с космосом, стимулирует совершенствование и создание МКА нового поколения, особенностью которых заключается в достижении высокого класса надежности, эффективности, снижения финансовых затрат и потребления мощности, что позволит увеличить время нахождения спутниковых систем на орбите.

#### Библиографические ссылки

1. Шалай В. В. Малые космические аппараты / под ред. В. Н. Блинов, Н. Н. Иванов, Ю. Н. Сеченов. Омск : Омский гос. техн. ун-т, 2010. 348 с.

2. Максимовский В. М. Малые космические аппараты для больших оборонных задач // Арсенал Отечества, 2015 [Электронный ресурс]. URL: <http://arsenal-otechestva.ru/article/617-smallspaceships> (дата обращения: 11.09.2019).

3. Пайсон Д. М. Малые спутники в современной космической деятельности [Электронный ресурс]. Гротек, 2017. 86 с. URL: <http://lib.tssonline.ru/articles2/bypub/sputnik-0-2017> (дата обращения: 11.09.2019).

4. Космический эшелон воздушно-космической обороны на технологиях миниатюризации космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vko.ru/oruzhie/bolshie-vozmozhnosti-pri-malyh-razmerah> (дата обращения 11.09.2019).

5. Гансвид И. Н. Малые космические аппараты – новое направление космической деятельности // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12. С. 84–90.

#### References

1. Shalai V. V. Small spacecraft / ed. V. N. Blinov, N.N. Ivanov, Yu.N. Sechenov. Omsk : State Omsk State Technical University, 2010. 348 p. (In Russ.).

2. Maksimovsky V. M. Small spacecraft for large defense tasks [Electronic resource] // Arsenal of the Fatherland, 2015. URL: <http://arsenal-otechestva.ru/article/617-smallspaceships> (accessed: 11.09.2019).

3. Payson D. M. Small satellites in modern space activity [Electronic resource]. Grotek, 2017. 86 p. URL: <http://lib.tssonline.ru/articles2/bypub/sputnik-0-2017> (accessed: 11.09.2019).

4. Space echelon of aerospace defense on technologies of spacecraft miniaturization [Electronic resource]. URL: <http://www.vko.ru/oruzhie/bolshie-vozmozhnosti-pri-malyh-razmerah> (accessed: 11.09.2019).

5. Genvid I. N. Small satellites – a new direction of space activities // International research journal. 2018. № 12. P. 84–90. (In Russ.).



**Секция**

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

УДК 519.7+004.93

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А. В. Бахтина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: anna-denisyuk@yandex.ru

*Рассматривается применение непараметрических алгоритмов распознавания образов в задачах оценивания состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования.*

*Ключевые слова: непараметрические алгоритмы распознавания образов, оценивание состояний природных объектов, многомерные случайные величины, ядерные оценки плотности вероятности, дистанционное зондирование.*

## INFORMATION SYSTEM ANALYSIS OF REMOTE SENSING DATA ON THE BASIS OF NONPARAMETRIC DECISION ALGORITHMS

A. V. Bakhtina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: anna-denisyuk@yandex.ru

*The application of nonparametric algorithms of pattern recognition in the problems of estimation of natural objects condition by remote sensing data is considered.*

*Keywords: nonparametric algorithms of pattern recognition, estimation of natural objects condition, multidimensional random variables, kernel probability density estimates, remote sensing.*

Информационная система предназначена для решения задач анализа данных дистанционного зондирования и принятия решений с использованием непараметрических алгоритмов распознавания образов, синтез которых основан на ядерных оценках плотности вероятности [1]. Исходную информацию составляют обучающие выборки о состояниях исследуемых природных объектов и соответствующих им спектральных данных, которые представляются в файлах Microsoft Excel. Применение программных средств обеспечивает выполнение следующих функций: первичная обработка данных дистанционного зондирования для оценивания основных количественных характеристик законов распределения случайных величин; проверка гипотезы о распределениях многомерных случайных величин на основе непараметрических алгоритмов распознавания образов; оценивания состояния природных объектов по спектральным данным; картирование территорий по состоянию природных объектов на основе спектральных данных элементов земной поверхности и соответствующих им пространственных координат. Результаты решения представленных функциональных задач сохраняются в виде отчетов в графических файлах и таблицах Microsoft Excel. Программные средства могут быть использованы при исследовании объектов различной природы по данным дистанционного зондирования [2–5].

Пусть имеется обучающая выборка  $V = (x^i, \delta(i), i = \overline{1, n})$  для решения многоальтернатив-

ной задачи распознавания образов, составленная из значений признаков  $x^i = (x_v^i, v = \overline{1, k})$  объектов исследования и указаний  $\delta(i)$  об их принадлежности к одному из классов  $\Omega_j, j = \overline{1, M}$ . Обозначим через  $n_j$  количество элементов обучающей выборке, соответствующих классу  $\Omega_j$ . Для оценивания состояний объекта исследований будем использовать непараметрические алгоритмы распознавания образов ядерного типа, соответствующие критерию максимального правдоподобия [2]

$$\bar{m}(x): x \in \Omega_j, \text{ если } \bar{p}_j(x) = \max_{t=1, M} \bar{p}_t(x), \quad (1)$$

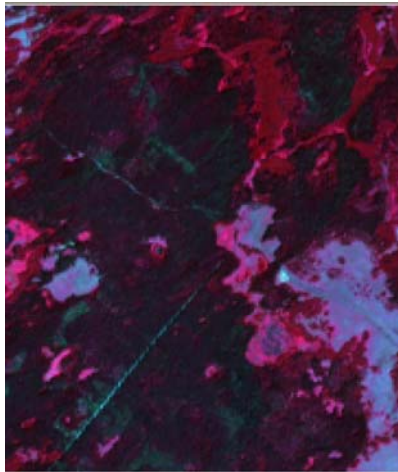
где непараметрическая оценка плотности вероятности определяется статистикой

$$\bar{p}_j(x) = \left( n_j \prod_{v=1}^k c_v \right)^{-1} \sum_{i=1}^{n_j} \prod_{v=1}^k \Phi \left( \frac{x_v - x_v^i}{c_v} \right).$$

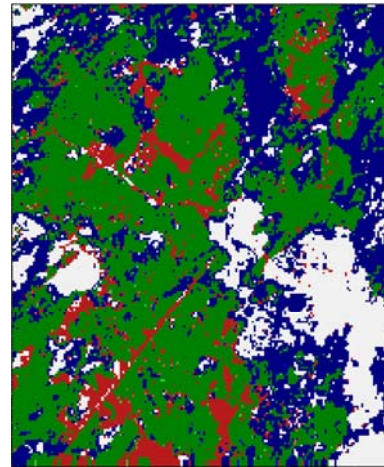
Здесь  $\Phi(u_v)$  – ядерные функции, удовлетворяющие условиям положительности, симметричности и нормированности;  $c_v, v = \overline{1, k}$  – их коэффициенты размытости. Оптимизация алгоритма (1) по коэффициентам размытости осуществляется из условия минимума эмпирической ошибки распознавания образов.

Результаты использования предлагаемых информационных средств при обработке исходного снимка приведены на рисунке.





а



б

Исходный снимок территории с аппарата Ландсат 8 (а) и результат его обработки с применением разработанной информационной системы (б)

Рассматривалась задача оценивания состояний древостоев лесных массивов по данным дистанционного зондирования, полученных с аппарата Ландсат 8. Каждый элемент земной поверхности характеризовался шестью спектральными признаками  $x = (x_1, \dots, x_6)$  в диапазоне длин волн (450–2300) нанометров.

Объём обучающей выборки  $V$  определялся значением  $n = 1701$ . Исходный снимок (см. рисунок, а) представлялся в виде контрольной выборки объёма  $n' = 39644$ . Состояния природного объекта  $\Omega_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$  соответствовали поврежденным лесным массивам, хвойным и лиственным древостоям. Оценка вероятности ошибки определения состояний древостоев лесных массивов с использованием непараметрического алгоритма (1) определяется значением  $\bar{p}(\bar{c}) = 0,035$ .

На рисунке б красным цветом отмечены участки территорий, которые соответствуют поврежденным древостоям. Зелёный и синий цвета соответствуют участкам с хвойными и лиственными древостоями. Фрагменты территорий, не принадлежащие у указанному классам представлены белым цветом.

#### Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А., Им С. Т., Бахтина А. В. Программные средства анализа данных дистанционного зондирования на основе непараметрических алгоритмов распознавания образов (NSARSD v. 1.0) : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618074 от 09.07.2018 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2018.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы оценивания состояний природных объектов // Автометрия. 2018. Т. 54, № 5. С. 33–39.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Информационная система оценивания состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования на основе непараметрических алгоритмов принятия решений //

Информатика и системы управления. 2019. Т. 59, № 1. С. 106–117.

4. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномерным 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.

5. 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.

#### References

1. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Bakhtina A. V. Programmnye sredstva analiza dannykh distantsionnogo zondirovaniya na osnove neparametricheskikh algoritmov raspoznavaniya obrazov (NSARSD v. 1.0) [Software for remote sensing data analysis based on nonparametric pattern recognition algorithms (NSARSD v. 1.0)]. Certificate of state registration of the program is RF № 2018618074. 09.07.2018.
2. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric algorithms for estimating the states of natural objects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54, № 5. P. 451–456.
3. Lapko A. V., Lapko V. A. [Information system for natural objects state estimation according to remote sensing data based on nonparametric decision-making algorithms]. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2019. Vol. 59, № 1. P. 106–117 (In Russ).
4. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables / A. V. Lapko, A. V. Lapko, S. T. Im et al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. p. 230–236.
5. 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, № 2. P. 238–244.

© Бахтина А. В., 2019

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ДЕШИФРИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГИДРОЛОКАТОРА  
БОКОВОГО ОБЗОРА, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В АКВАТОРИИ НИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ЕНИСЕЙ**

А. Е. Гончаров, Ю. П. Юронен

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

*Рассматривается проблема дешифрирование снимков, полученных при помощи использования гидролокатора бокового обзора при изучении акватории реки Енисей в его нижнем и среднем течении. Несмотря на то что применение данного метода визуализации до настоящего времени находило лишь ограниченное применение в акватории указанной реки, авторы отмечают высокую степень его перспективности.*

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, гидролокатор бокового обзора, дешифрирование, гидрография, Енисей.*

**INTERPRETATION OF SIDESCAN SONAR IMAGERY OF THE UPPER  
AND MIDDLE REACHES OF THE RIVER YENISEI**

A. E. Goncharov, Yu. P. Yuronen

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: goncharovae@sibsau.ru

*In this paper the authors discuss some aspects related to interoperating sidescan sonar imagery, collected during a series of field investigations in the upper and lower reaches of the River Yenisei in Central Siberia. It is noted that while underwater acoustic imaging systems have (until recently) found limited application on the Yenisei, they have proven to be highly effective for collecting knowledge on local hydrography.*

*Keywords: remote sensing, sidescanning sonar, image interpreting, hydrography, Yenisei.*

В настоящее время акустические системы подводной визуализации получили широкое распространение для изучения акваторий внутренних водоемов, в том числе малых, средних и крупных рек. Гидроакустические приборы активно применяются для изучения бентической зоны водоемов, локализации и оценки объемов затонувшей древесины, изучения геоморфологических процессов в руслах рек, археологических исследованиях, изысканий с целью проектирования и возведения гидротехнических сооружений и их последующих осмотров. Среди доступных на рынке приборов наибольшей популярностью пользуются гидролокаторы бокового обзора (ГБО) с рабочими частотами от 455 кГц до 1 мГц. При этом, начиная с 2010-х гг. крупные зарубежные производители навигационной электроники для маломерных судов (Garmin, Lowrance, Humminbird и другие) начали выпускать многолучевые рыболовецкие эхолоты со встроенной функцией ГБО [1]. Рабочие частоты для наиболее производительных приборов колеблются (в среднем) от 50 кГц для определения глубины и профилирования дна (низового обзора (например, Down Imaging для систем Humminbird)) и 455 кГц. При этом более низкие частоты (килогерцовые), благодаря своим проникающим способностям, позволяют визуализировать донные объекты на больших глубинах, не-

жели мегагерцовые частоты; однако, в случае с высокочастотными излучателями глубина изысканий уменьшается при увеличении разрешающей способности прибора. В случае использования низкочастотных излучателей оператор, как правило, видит только обобщенную структуру дна и геометрические формы наиболее крупных объектов. Более высокие частоты позволяют увеличивать разрешающую способность приборов и визуализировать (в зависимости от глубины и условий прохождения трансдюсера в зоне видимости объекта) мельчайшие объекты (автомобильные покрышки, якоря, тросы, бытовой мусор).

В настоящем исследовании использовались два гидроакустических прибора:

1. Буксируемый ГБО Tritech Starfish 990F (рабочая частота 1 мГц).
2. Эхолот Humminbird ONIX 10 cxi SI Combo (рабочая частота ГБО – 455 кГц).

Принцип работы приборов построен на распространении акустических сигналов в сплошных средах. Схема работы прибора указана на рис. 1.

Таким образом, используя ГБО, мы можем получить отклик сигнала от поверхности. Полученные данные можно представить в виде изображения, которое визуализирует характеристики эхограммы на плоскости. Для определения объектов по полученным

изображениям можно применять прямые и косвенные дешифровочные признаки. К первым относятся – геометрические характеристики объектов, тон, текстура, структура акустическая тень. Ко второй категории признаков относятся, как правило, признаки, которые не явно выражены на изображении, однако по ряду прямых признаков можно судить о том, или ином объекте или явлении.

Например, схожие объекты на эхограмме могут отображаться по разному (рис. 2).

На рис. 2, *а* визуализируется объект, который можно идентифицировать как затонувшее судно по

следующим признакам: геометрические характеристики объекта (элементы конструкции, размеры). На рис. 2, *б* однозначных прямых признаков затонувшего судна не просматривается, однако по характеру акустической тени и характеру наносного материала (гальки) в купе с текстурой дна можно с уверенностью предположить, что видимый объект является затонувшим судном, что подтверждается гидрографическими данными [3]. Другим примером косвенного дешифрирования гидроакустических данных является оценка геометрических характеристик акустической тени (рис. 3).

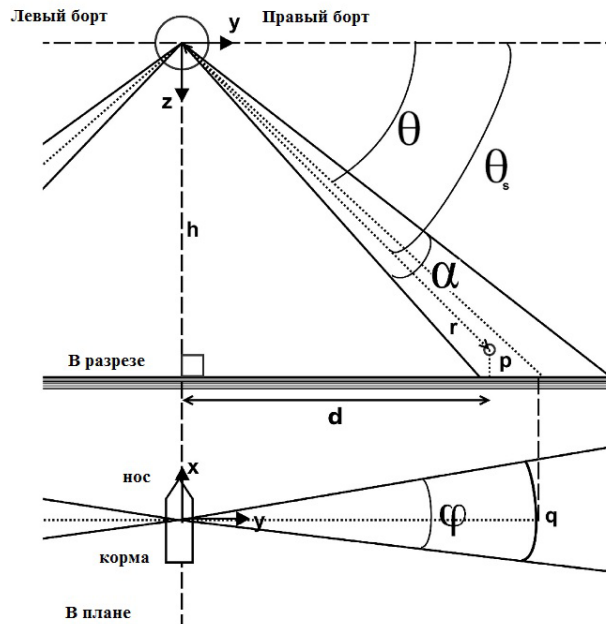
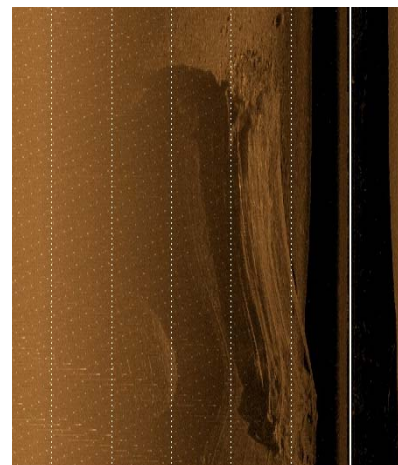


Рис. 1. Принцип работы гидролокатора бокового обзора:  $h$  – глубина от трансьюера до дна;  $\theta$  – угол луча относительно условного горизонта водоема;  $\alpha$ ,  $\phi$  – углы луча трансьюера; точка  $p$  определяется на удалении  $r$  по дуге  $q$  и выражается парой координат  $xy$  [2]



*а*



*б*

Рис. 2. Затонувшее судно:

*а* – затонувшее судно с выраженными прямыми дешифровочными признаками;  
*б* – затонувшее судно, определенное по косвенным дешифровочным признакам

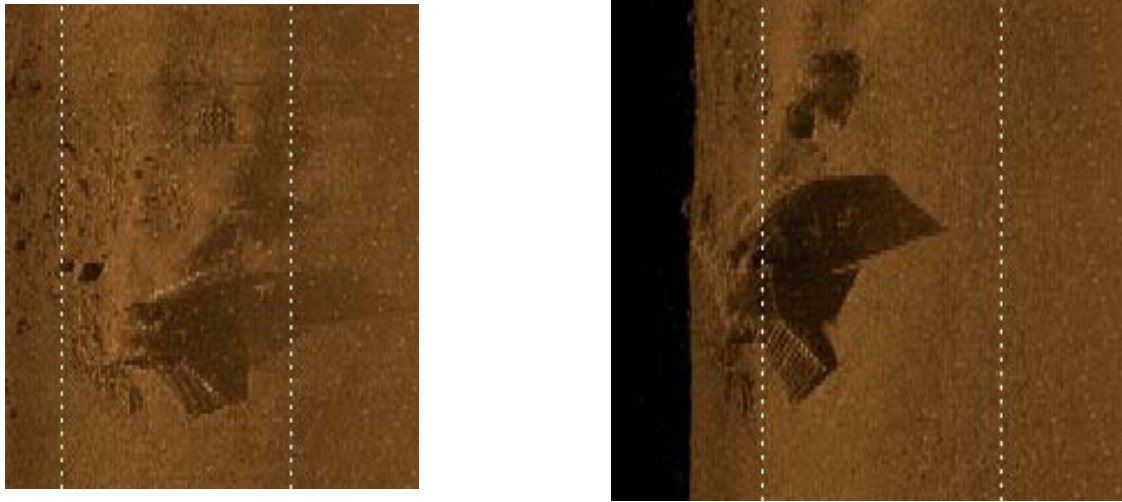


Рис. 3. Затонувший объект (транспортный контейнер) с выраженной акустической тенью

На рис. 3 можно наблюдать характерную акустическую тень прямоугольной формы с прямым углом, что может соответствовать объекту типа транспортного контейнера. Эти данные подтверждаются подводными изысканиями, выполненными в последующем с подъемом этого объекта (транспортного контейнера) на поверхность.

Одной из наиболее серьезных проблем при использовании ГБО является течение водоема и необходимость выдерживать прямолинейный курс судна. В случае если это не выполняется, изображение искажается, что сказывается на результатах дешифрирования (рис. 2, б).

На рис. 2, б мы видим, что в результате невозможности удержания прямолинейного курса из-за сильного свального течения (до 1,5 м/с) изображение становится искаженным (приобретает волнообразный вид).

По результатам проделанной работы, можно констатировать, что акустические изображения полученные при помощи ГБО при работе на реки Енисей могут быть использованы для определения положения и характеристик донных объектов. Однако существующие методики получения и обработки этих данных требуют непосредственного участия человека в качестве оператора и интерпретатора, дешифровщика данных, что может привести к снижению эффективности подобного рода изысканий и увеличивает риск невыявления объектов в связи с человеческим факто-

ром (усталость оператора или недостаточный уровень его квалификации).

#### Библиографические ссылки

1. Bollinger M. A., Kline R. J. Validating sidescan sonar as a fish survey tool over artificial reefs // *Journal of Coastal Research*. 2017. № 33(6). P. 1397–1407.
2. Buscombe D. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar // *Environmental Modelling & Software*. 2017. № 89. P. 1–18.
3. Карта реки Енисей от Красноярской ГЭС до устья реки Ангара. СПб. : ГБУ «Волго-Балт», 2008.

#### References

1. Bollinger M. A., Kline R. J. Validating sidescan sonar as a fish survey tool over artificial reefs // *Journal of Coastal Research*. 2017. № 33(6). P. 1397–1407.
2. Buscombe D. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar // *Environmental Modelling & Software*. 2017. № 89. P. 1–18.
3. Karta reki Enisei ot Krasnoiaraskoi GES do ust'ia reki Angara [Map of the River Yenisei from the Krasnoyarsk Hydroelectric Power Plant to the confluence of the River Angara]. St. Petersburg: GBU "Volgo-Balt", 2008. 31 sheets (in Russ.).

© Гончаров А. Е., Юронен Ю. П., 2019

## СПЕЦИФИКА И МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА В АКВАТОРИИ РЕКИ ЕНИСЕЙ

А. Е. Гончаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*Применение гидролокатора бокового обзора (ГБО) на реке Енисей с целью визуализации донной поверхности и выявления подводных объектов – относительно новое явление. Рассмотрены некоторые особенности использования данного прибора в акватории Енисея.*

*Ключевые слова: гидролокатор бокового обзора, дешифрирование, гидрография, Енисей.*

## SIDESCAN SONAR DEPLOYMENT TECHNIQUES FOR THE RIVER YENISEI

A. E. Goncharov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*Using sidescanning sonar (SSS) on the River Yenisei in central Siberia is a rather new technique for riverbed visualization. In this short paper, the author discusses on some of the main features of SSS deployment for the Yenisei.*

*Keywords: sidescanning sonar, image interpreting, hydrography, Yenisei.*

В последние десятилетие ультразвуковые гидроакустические системы визуализации получили широкое применение для гидрографических исследований. Особое место здесь занимает гидролокатор бокового обзора (ГБО), который применяется для всевозможных изысканий, связанных с необходимостью визуализации поверхности дна водоемов. На сегодняшний день ГБО является наиболее эффективным устройством для выполнения данной задачи, поскольку позволяет производить работы без необходимости привлечения водолазов и может работать в водоемах с быстрым течением и мутной водой. С начала 2010-х гг. многие крупные производители навигационной электроники (Garmin, Lowrance, Humminbird и другие) начали включать функцию ГБО в новейшие модели своих рыболовных эхолотов. Это, а также стремительное развитие прикладной гидроакустики объясняет популярность данного устройства при выполнении исследований водоемов [1; 2].

Начиная с 2018 г. ГБО активно применяется коллективом СибГУ им. М. Ф. Решетнева в рамках стратегического проекта «Географическая информационная система (ГИС) «Енисей – Арктика» для изучения акватории реки Енисей с целью отработки методики построения водной ГИС и использования гидроакустических систем визуализации в акватории реки Енисей и ее бассейна. Это первое широкое применение данного прибора на Енисее для исследования донных геоморфологических процессов, выявления и каталогизации антропогенных подводных объектов, в том числе объектов исторического наследия и построения трехмерной цифровой модели акватории реки (ранее нами изучались перспективы использования ГБО на Енисее с целью изучения подводных объ-

ектов [3]). На настоящем этапе была проведена серия полевых работ с целью отработки методики использования ГБО на Енисее и сбора данных для построения цифровых моделей. В ходе изысканий применялись два гидроакустических устройства:

1. Буксируемый ГБО Tritech Starfish 990F.
2. Эхолот Humminbird ONIX 10 cxi SI Combo.

В таблице приведены некоторые характеристики данных приборов.

Работа ГБО систем в условиях крупных рек имеют свои особенности, описание которых мы не встречали в научной литературе, поэтому приведем их в настоящей работе.

1. Глубина реки. Глубины Енисея в судоходной части составляют от 2,5 в верхнем и среднем течении до 30 – 40 и даже более 60 м (район Селекинского мыса) в нижнем течении. Как отмечено в таблице, максимальная глубина работы первого прибора составляет 35 м, а второго прибора – не более 10 м (рис. 1).

В случае стационарного закрепления трансдюсера на жесткой штанге (первого прибора; второй прибор постоянно закреплен и находится на небольшом (не более 20 см) заглублении), прибор позволяет визуализировать глубины до 10–15 м. При больших глубинах большая часть области пройденного галса остается невидимой для прибора (рис. 2).

В этом случае буксируемый трансдюсер (снаряд, рыбу) необходимо буксировать. При этом скорость буксировки не должна превышать 8 kn (14 км/ч) поскольку при больших скоростях изображение может сильно исказиться. Кроме того, при буксировке судно должно выдерживать максимально прямые галсы чтобы избежать бокового смещения буксируемого

модуля (рис. 3). Закрепление трансдюсера на штанге имеет свои недостатки в виду того, что бортовая качка судна приводит к еще более сильному раскачиванию трансдюсера в связи с удалённостью его от центра тяжести судна.

Еще одним важным фактором, который необходимо учесть (особенно при работе в районах верхнего и среднего Енисея), это скорость течения. Так, на уча-

стке от Красноярска до устья реки Ангара средняя скорость течения реки составляет около 1,5 м/с. При буксировке такая высокая скорость не позволяет производить работы против течения: буксируемый модуль невозможно удерживать ровно, его постоянно сносит, при увеличении скорости судна трансдюсер либо вырывает из воды, либо он начинает «вилять», существенно искажая изображение.

### Характеристики приборов

Показатель	Starfish 990F	Humminbird ONIX 10 cxi SI Combo (ГБО)
Рабочая частота	1 мГц	455 кГц
Дальность охвата по каждому борту	35 м	35 м
Максимальная глубина работы	35–40 м	8–10 м

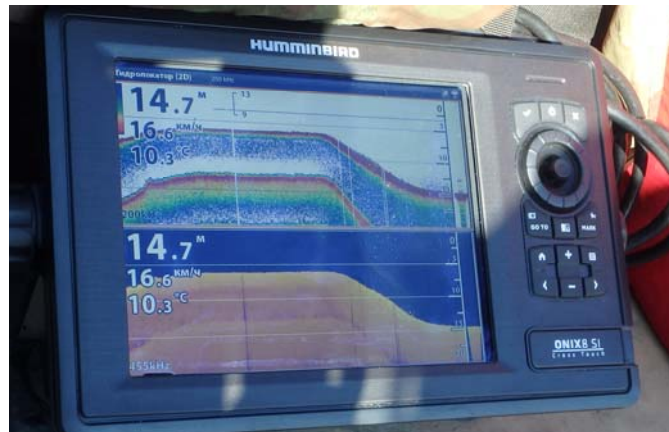


Рис. 1. Экран эхолота Humminbird ONIX 10 cxi при работе с глубиной 14,7 м. Активированы режимы эхограммы (200 кГц) и низового обзора (455 кГц). При работе на глубинах свыше 10 м боковой обзор невозможно применить для данной модели

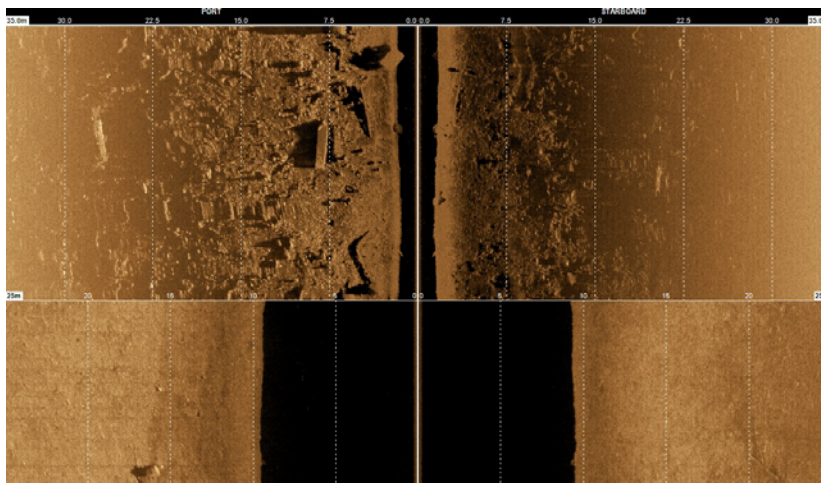


Рис. 2. Пример визуализации дна Енисея в плане ГБО Starfish 990F (1 мГц) с выраженной слепой зоной. В верхней части изображения – буксируемый модуль имеет максимальное заглубление и проводится на высоте 0,5–1 м от поверхности дна. В нижней части изображения – трансдюсер находится на высоте более 10 м от поверхности дна

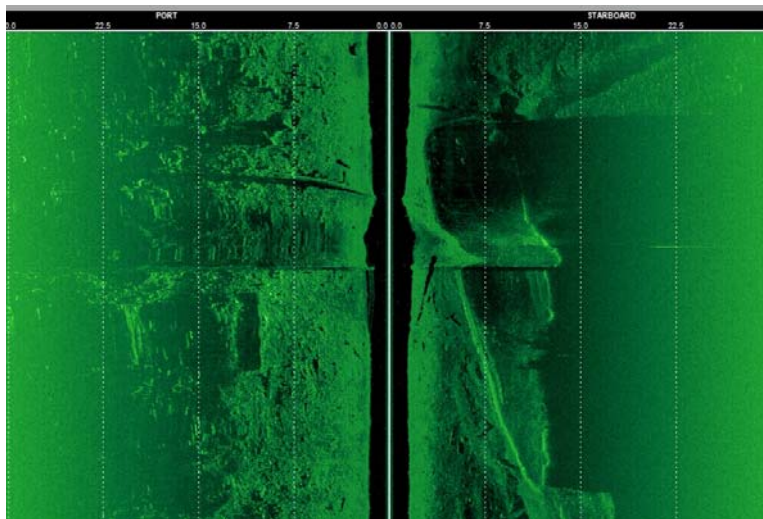


Рис. 3. Пример гидроакустического снимка с резким волнообразным искажением донного объекта (затонувшего судна). Причина – резкий подъем буксируемого модуля с целью предотвращения его зацепления за донный объект

Прибор Эхолот Humminbird ONIX 10 sxi при работе против течения оказался еще менее эффективным в связи с чувствительностью к увеличению объема акустических помех (шум воды, омывающей корпус лодки, возросшая мощность двигателя). Кроме того, работа на течение усложняется трудностью удержания судна на постоянном курсе, что необходимо для получения качественного изображения дна.

Таким образом, наибольшие сложности для эффективного выполнения изысканий при помощи ГБО на Енисее являются непостоянные глубины реки с резкими перепадами и сильная скорость течения в верхнем и среднем течении реки.

#### Библиографические ссылки

1. Bollinger M. A., Kline R. J. Validating sidescan sonar as a fish survey tool over artificial reefs // *Journal of Coastal Research*. 2017. № 33(6). P. 1397–1407.
2. Buscombe D. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar // *Environmental Modelling & Software*. 2017. № 89. P. 1–18.

3. Goncharov A. E., Mednikov D. M., Karelin N. M., Nasyrov I. R. Prospects for using sonar for underwater archeology on the Yenisei: exploring a 19th century shipwreck // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 155.

#### References

1. Bollinger M. A., Kline R. J. Validating sidescan sonar as a fish survey tool over artificial reefs // *Journal of Coastal Research*. 2017. № 33(6). P. 1397–1407.
2. Buscombe D. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar // *Environmental Modelling & Software*. 2017. № 89. P. 1–18.
3. Goncharov A. E., Mednikov D. M., Karelin N. M., Nasyrov I. R. Prospects for using sonar for underwater archeology on the Yenisei: exploring a 19th century shipwreck // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 155.

© Гончаров А. Е., 2019

## ДИНАМИКА СОМКНУТОСТИ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ СРЕДНЕЙ СИБИРИ В XXI ВЕКЕ\*

С. Т. Им<sup>1,2\*</sup>, В. Г. Ли<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КИЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28

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

<sup>3</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*По материалам дистанционного зондирования MODIS проведен анализ изменения сомкнутости темнохвойных лесов Средней Сибири. Динамика сомкнутости сопоставлена с эколого-климатическими переменными и рельефом местности.*

*Ключевые слова: темнохвойные, сомкнутость, Средняя Сибирь, MODIS.*

## DARKNEEDLE STAND CLOSURE DYNAMICS IN CENTRAL SIBERIA IN THE XXI CENTURY

S. T. Im<sup>1,2\*</sup>, V. G. Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sukachev Institute of Forest SB RAS – Separate Unit FIC KSC SB RAS  
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Changes of closure of the darkneedle stands in Central Siberia was analyzed based on MODIS remote sensing data. Closure dynamics was related to eco-climatic factors and topography.*

*Keywords: darkneedle, closure, Central Siberia, MODIS.*

В XXI столетии в таежных лесах Сибири отмечается значимое возрастание площади погибших темнохвойных лесов в результате климатических изменений, приведших к ослаблению деревьев и росту активности агрессивных насекомых вредителей и болезней [1; 2]. С другой стороны, наблюдается рост сомкнутости хвойных вечнозеленых лесов [3]. Отмечается распространение темнохвойных древостоев в зону доминирования лиственницы [4], продвижение хвойных на север и вверх по градиенту высоты [5; 6]. В связи с этим целью данной работы являлся пространственный анализ динамики сомкнутости темнохвойных лесов средней Сибири в XXI веке в связи с климатическими трендами и орографией местности на основе данных дистанционного зондирования и ГИС.

**Объект исследования** расположен в Средней Сибири (~5,4 млн км<sup>2</sup>; 80–115° в.д.; 48–75° с.ш.). Высота рельефа варьируется от 0 до 270 м над у.м. на равнинных участках левобережья Енисея, и до 1580 м на правобережье, и до 4435 м в горах Алтая. Средние летние температуры – +8...+10 °С, на севере до +20 °С на юге, среднегодовые от –8 до –40 °С, зимние –20...–45 °С. Количество годовых осадков 200–1200 мм,

летних – 80–250 мм, зимних – 70–120 мм. Хвойные древостои представлены кедром (*Pinus sibirica*), сосной (*Pinus silvestris*), пихтой (*Abies sibirica*), елью (*Picea obovata*) и лиственницей (*Larix gmelinii*). Площадь темнохвойных древостоев ~9 % (470 тыс. км<sup>2</sup>), лиственничных – 27 % (1470 тыс. км<sup>2</sup>).

**Материалы и методы.** Анализировалось проективное покрытие деревьями на основе данных MODIS MOD44B за 2000–2016 гг. Гари устранены из анализа в соответствии с MCD64A1 (<http://modis-fire.umd.edu>). Темнохвойные и лиственничные древостои выделены по картам наземного покрова Russia Land Cover 2010 (<http://pro-vega.ru>) и GLC2000 (<https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>). Производился расчет карт трендов сомкнутости древостоев и карт корреляций между сомкнутостью и климатическими переменными. Эколого-климатические переменные извлекались из CRU TS 4.02 (<https://crudata.uea.ac.uk>), SPEI (<https://spei.csic.es>) и MERRA2 (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2>). Использовалась ЦМР GMTED2010 (<http://www.usgs.gov/land-resources/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010>). Геообработка производилась в программном пакете ESRI ArcGIS (<https://www.arcgis.com>).

\*Исследования поддержаны грантами РФФИ № 18-05-00432 и № 18-45-240003.



**Результаты.** Сомкнутость в темнохвойных лесах преимущественно падала. На 2,4 % площади темнохвойных наблюдались положительные тренды и на 11 % – отрицательные. Положительные тренды сомкнутости темнохвойных древостоев наблюдались в южной части территории (50–56° с.ш.), отрицательные – в средней части (56–62° с.ш.).

В целом, с 2000 по 2005 гг. в темнохвойных лесах сомкнутость возрастала, а после 2005 г. – уменьшалась. Значительное сокращение площадей темнохвойных древостоев связано со вспышкой массового размножения сибирского шелкопряда в южной части Сибири, начавшейся в 2014 г. Также, это связано с вырубкой лесов, например, в Иркутской области. В Алтае-Саянском регионе гибель темнохвойных лесов инициировано водным стрессом, приведшим к ослаблению древостоев и их последующему усыханию из-за воздействия насекомых вредителей и болезней [6].

Характер изменения сомкнутости древостоев связан с высотой над уровнем моря. Сомкнутость темнохвойных древостоев уменьшалась на высотах ниже 1600 м над у.м., а выше – возрастала. Ранее, похожая закономерность отмечалась для Алтае-Саянского региона [6].

Статистически значимая ( $p < 0,05$ ) корреляция динамики сомкнутости с эколого-климатическими параметрами за летний период наблюдалась для ~7 % темнохвойных древостоев. В темнохвойных древостоях преобладала положительная связь с параметрами влажности (количество осадков, индекс сухости SPEI, влажность корнеобитаемого слоя) и отрицательная – с температурой.

**Заключение.** В целом, в начале XXI века в средней Сибири в темнохвойных лесах наблюдалось падение сомкнутости. Падение сомкнутости в темнохвойных древостоях наблюдалось в средней части Сибири (56–62° с.ш.), рост – в южной части

(50–56° с.ш.). Сомкнутость падала на высотах ниже 1600 м над у.м., выше – возрастала. Выявленная динамика сомкнутости на ~7 % площади темнохвойных древостоев связана с вариацией эколого-климатических переменных за летний период. Преобладала положительная связь ( $p < 0,05$ ) с параметрами влажности и отрицательная – с температурой.

## References

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. et al. Fir Decline and Mortality in the Southern Siberian Mountains. *Regional Environmental Change*. 2017. Vol. 17, № 3. P. 803–812.
2. Kharuk V. I., Shushpanov A. S. Petrov I. A. et al. Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) Mortality in Mountain Forests of the Eastern Sayan Ridge, Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2019. Vol. 12, № 4. P. 299–309.
3. He Y., Huang J., Shugart H. H., Guan X. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus. *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30, № 13. P. 5021–5039.
4. Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia // *Eurasian Journal of Forest Research*. 2007. Vol. 10. P. 163–171.
5. Shiyatov S. G., Terent'ev M. M., Fomin V. V., Zimmermann N. E. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century // *Russian Journal of Ecology*. 2007. Vol. 38, № 4. P. 223–227.
6. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Warming hiatus and evergreen conifers in Altay-Sayan Region, Siberia // *Journal of Mountain Science*. 2018. Vol. 15, № 12. P. 2579–2589.

© Им С. Т., Ли В. Г., 2019

УДК 630:004.9

## МЕТОДИКА ГИС-АНАЛИЗА СЕВЕРНОЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСОВ\*

С. Т. Им<sup>1,2\*</sup>, В. Г. Ли<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28

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

<sup>3</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*Разработан алгоритм автоматизированного выделения северной границы сомкнутых древостоев. Алгоритм реализован с помощью ГИС-инструментов в среде ESRI ArcGIS. Использованный подход позволил определить северные границы вечнозеленых хвойных древостоев по данным съемки MODIS и их пространственные доверительные интервалы для двух исследуемых периодов (2001–2003 и 2014–2016 гг.). Пространственное сопоставление выявленных границ выявило продвижение северной границы ВЗХ древостоев на север в начале XXI века в Средней Сибири (в среднем на 26±1 км за 2001–2016 гг.).*

*Ключевые слова:* ГИС-анализ, северная граница лесов, MODIS.

## A GIS-BASED APPROACH TO ANALYZE THE NORTHERN FOREST BORDER

S. T. Im<sup>1,2\*</sup>, V. G. Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sukachev Institute of Forest SB RAS – Separate Unit FIC KSC SB RAS  
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

\*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

*An automated algorithm of delineation of the northern forest border was developed. The algorithm was realized based on the ESRI ArcGIS software. This algorithm allowed us to identify the northern border of evergreen conifer stands and its confidence intervals for two periods (2001–2003 and 2014–2016 yrs.) based on the MODIS remote sensing data. A spatial comparison of the northern borders of evergreen conifer stands revealed northward expansion of evergreen conifer stands in the beginning of the XXI century (in average on 26±1 km during 2001–2016).*

*Keywords:* GIS-analysis, northern timberline, MODIS.

Бореальные леса в России покрывают более 500 млн. га. В XXI веке в Сибири отмечается рост сомкнутости хвойных вечнозеленых лесов (ВЗХ), связанный с изменениями климата [1; 2]. Отмечается распространение ВЗХ древостоев в зону доминирования лиственницы [2]. Древесная растительность продвигается на север [3; 4]. Однако остается малоизученным вопрос о смещении северных границ лесов на обширных территориях, и, в частности, в Сибири. Для проведения пространственного анализа границы древостоев на больших территориях необходимо применение данных дистанционного зондирования. Цель данной работы заключалась в разработке автоматизированного алгоритма выделения северной границы лесов на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий.

Разработанный алгоритм автоматизированного выделения северной границы древостоев по временной серии карт лесов на основе ГИС состоял из следующих этапов:

1. По данным MCD64A1 (<http://modis-fire.umd.edu>; <ftp://ba1.geog.umd.edu>) сформирована маска гарей за период наблюдений (2000–2016 гг.).

2. Выделение северной границы сомкнутых ВЗХ древостоев основано на временной серии карт растительного покрова IGBP MCD12Q1, полученной по данным съемки MODIS [5]. Пространственное разрешение указанных карт 500 м, период – 2001–2016 гг. В анализе применялся продукт MCD12Q1 версии C6 [6]. Согласно классификации IGBP, класс ВЗХ представляет собой участки земли с преобладанием вечнозеленых хвойных древостоев с покрытием >60 %. Точность классификации составляет ~67–74 % [7]. Сомкнутые ВЗХ древостои формируют условную границу сомкнутых лесов. Из временной серии классификационных картосхем MCD12Q1 устранены гари по ранее созданной маске. Картосхемы спроецированы в равновеликую проекцию Альберса.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00432 и 18-01-00251).

3. Для «стабилизации» классификаций из карт начального периода (2001–2003) сформирована обобщенная картосхема ВЗХ древостоев, в которой единицей обозначены пиксели, соответствующие классу ВЗХ древостоев, присутствовавшие одновременно во всех слоях начального периода. Нулем закодирован класс фона. Таким же образом сформирована обобщенная картосхема ВЗХ древостоев для конечного периода (2014–2016 гг.).

4. По полученным картосхемам сгенерированы векторные линии границы ВЗХ древостоев путем соединения самых северных пикселей вдоль параллели. Северные пикселя ВЗХ определялись путем трассирования всех пикселей вдоль меридианов с севера на юг.

5. Производилась фильтрация «выбросов» (превышающих три стандартных отклонения) вдоль меридиана, т.е. устранение узловых точек из векторной линии сформированной границы ВЗХ древостоев в пределах скользящего окна размером 50 км.

6. Отфильтрованные линии границ ВЗХ древостоев усреднялись в пределах скользящего окна размером 50 км по долготе. В результате получены усредненные границы ВЗХ древостоев. Для сгенерированных границ рассчитывались полигональные области доверительного интервала ( $P > 0,95$ ). Дополнительно рассчитывались полигональные области шириной в три стандартных отклонения, характеризующих ширину переходной зоны вдоль выделенной границы. Значения в пределах скользящего окна, в котором производится усреднение, соответствуют нормальному распределению.

7. Смещение границы леса вычислялось как разность между усредненными векторными линиями границ ВЗХ древостоев начального и конечного периодов вдоль меридиана. В зонах значимых смещений границы ВЗХ проводился анализ динамики климатических переменных и связь с орографией местности. Рассчитывалась динамика площади ВЗХ за 2001–2016 гг.

Алгоритм позволяет регулировать размерность скользящего окна, в пределах которого производится усреднение линии границы леса. При расчетах использовалось окно в 50 км, что при пространственном разрешении 500 м (для карт IGBP MCD12Q1) соответствует 100 пикселям. При  $P = 0,95$  доверительный интервал для среднего составлял ~20 % от стандартного отклонения. Реализация алгоритма расчета границ леса и обработка пространственных данных производились в программном пакете ESRI ArcGIS (<https://www.arcgis.com>) с применением скриптов на языке программирования Python.

Использованный подход позволил определить северные границы вечнозеленых хвойных древостоев по данным съемки MODIS и их пространственные доверительные интервалы для двух исследуемых периодов (2001–2003 и 2014–2016 гг.). Пространственное сопоставление выявленных границ выявило продвижение северной границы ВЗХ древостоев на север в начале XXI века в средней Сибири (в среднем на  $26 \pm 1$  км за 2001–2016 гг.).

#### Библиографические ссылки

1. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus / Y. He, J. Huang,

H. H. Shugart et al. // *Journal of Climate*, 2017. Vol. 30 (13). P. 5021–5039.

2. Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia // *Eurasian Journal of Forest Research*. 2007. Vol. 10. P. 163–171.

3. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev, V. V. Fomin et al. // *Russian Journal of Ecology*. 2007. Vol. 38 (4). P. 223–227.

4. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры / В. И. Харук, С. Т. Им, К. Дж. Рэнсон и др. // Доклады академии наук. 2004. Т. 398 (3). С. 1–5.

5. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets / M. A. Friedl, D. Sulla-Menashe, B. Tan et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114. P. 168–182.

6. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product / D. Sulla-Menashe, J. M. Gray, S. P. Abercrombie et al. // *Remote Sensing of Environment*, 2019. Vol. 222. P. 183–194.

7. Comparison and Assessment of Coarse Resolution Land Cover Maps for Northern Eurasia / D. Pflugmacher, O. N. Krankina, W. B. Cohen et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. P. 3539–3553.

#### References

1. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus / Y. He, J. Huang, H. H. Shugart et al. // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30 (13). P. 5021–5039.

2. Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia // *Eurasian Journal of Forest Research*. 2007. Vol. 10. P. 163–171.

3. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev, V. V. Fomin et al. // *Russian Journal of Ecology*. 2007. Vol. 38 (4). P. 223–227.

4. Kharuk V. I., Im S. T., Ranson K. J., Naurzbaev M. M. Temporal dynamics of larch in the forest-tundra ecotone. *Doklady Earth Sciences*. 2004, vol. 398, no. 7, p. 1020–1023.

5. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets / M. A. Friedl, D. Sulla-Menashe, B. Tan et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114. P. 168–182.

6. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product / D. Sulla-Menashe, J. M. Gray, S. P. Abercrombie et al. // *Remote Sensing of Environment*, 2019. Vol. 222. P. 183–194.

7. Comparison and Assessment of Coarse Resolution Land Cover Maps for Northern Eurasia / D. Pflugmacher, O. N. Krankina, W. B. Cohen et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. P. 3539–3553.

© Им С. Т., Ли В. Г., 2019

## ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ В СТРАТОСФЕРЕ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ ВЕСНОЙ 2014–2015 гг. ПО ДАННЫМ OMI/AURA

В. Б. Кашкин<sup>1</sup>, Т. В. Рублева<sup>1</sup>, К. В. Шеляпина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/45  
E-mail: tvrubleva@mail.ru

*Рассмотрены особенности циркумполярного вихря и вариаций озоносферы в южном полушарии весной в 2014–2015 годах, выявленные по спутниковым данным.*

*Ключевые слова: спутниковые данные, циркумполярный вихрь, озон, озоновая дыра.*

## FEATURES OF ATMOSPHERIC DYNAMICS IN THE STRATOSPHERE OF THE SOUTHERN HEMISPHERE SPRING 2014–2015 ACCORDING TO OMI/URA

V. B. Kashkin<sup>1</sup>, T. V. Rubleva<sup>1</sup>, K. V. Shelyapina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
<sup>2</sup>Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS  
50/45, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: tvrubleva@mail.ru

*The paper discusses the features of the circumpolar vortex and variations of ozone layer in the southern hemisphere spring in 2014–2015 revealed by satellite data.*

*Keywords: satellite data, circumpolar vortex, ozone, ozone hole.*

Пространственно-временное распределение общего содержания озона (ОСО) в атмосфере изучается на основе данных наземной сети наблюдений и космического мониторинга. Здесь ОСО – толщина слоя озона в мм/100 в вертикальном столбе атмосферы, выделенного при нормальных условиях [1]. В работе исследовалось состояние озонового слоя весной 2014 и 2015 г. с помощью спутниковых данных, представленных на сайте [2]. В это время над полярными широтами Южного полушария (ЮП) формируется планетарная аномалия (Антарктическая озоновая дыра), которая наблюдается здесь ежегодно, начиная с 1985 г. Весной 2015 г. в полярных и умеренных широтах ЮП наблюдалось необычное пространственное распределение стратосферного озона [3; 4].

Данные об ОСО получены из измерений спектрометра OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленного на спутнике AURA (запущен в 2004 г., USA) [2]. Космический аппарат AURA – один из 6 спутников международной космической группировки A-TRAIN (Afternoon Constellation TRAIN). Спутник движется по солнечно-синхронной орбите, его характеристики: высота ~700 км, угол наклона 98.1°, период обращения 98,82 мин. Прибор OMI/AURA измеряет интенсивность уходящего солнечного излучения в двух каналах УФ-области UV-1 (264–311 нм)

и UV-2 (307–383 нм), а также в видимой области – канал VIS (349–504 нм) [1]. Погрешность измерений ОСО 2–4 %.

Формирование поля ОСО происходит в нижней стратосфере под влиянием системы общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Одним из ее глобальных элементов является циркумполярный вихрь (ЦВ), представляющий собой циклоническое вращение воздушных масс вокруг полюса с запада на восток, простираясь от тропосферы до стратосферы [5]. Существование этого планетарного вихря обусловлено градиентами температуры между экватором и полюсом.

Для изучения динамики циркумполярного вихря в ЮП в 2014–2015 гг. использовались значения его зональной скорости на 60° ю.ш. (границе полярного фронта), представленные в [6]. Тренды зональной скорости ЦВ в исследуемые периоды приведены на рис. 1, в качестве аппроксимирующей функции выбран полином 6 степени. Здесь  $u(V)_1$  – тренд зональной скорости ЦВ в 2014 г., а  $u(V)_2$  – в 2015 г. На рис. 1 можно проследить сезонный ход ЦВ в Южном полушарии. Циркумполярный вихрь усиливается от февраля к июлю и замедляется от июля к декабрю. Эти периоды совпадают с двумя режимами циркумполярного движения нижней стратосферы в области средних широт ЮП, выявленные в [1].

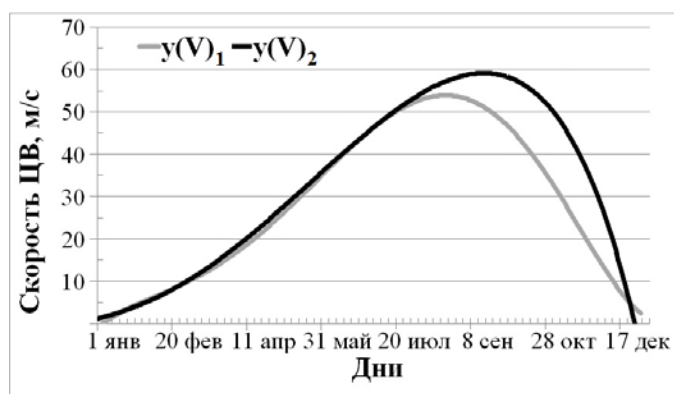


Рис. 1. Внутригодовой ход трендов скорости циркумполярного вихря ЮП в 2014 и 2015 гг.

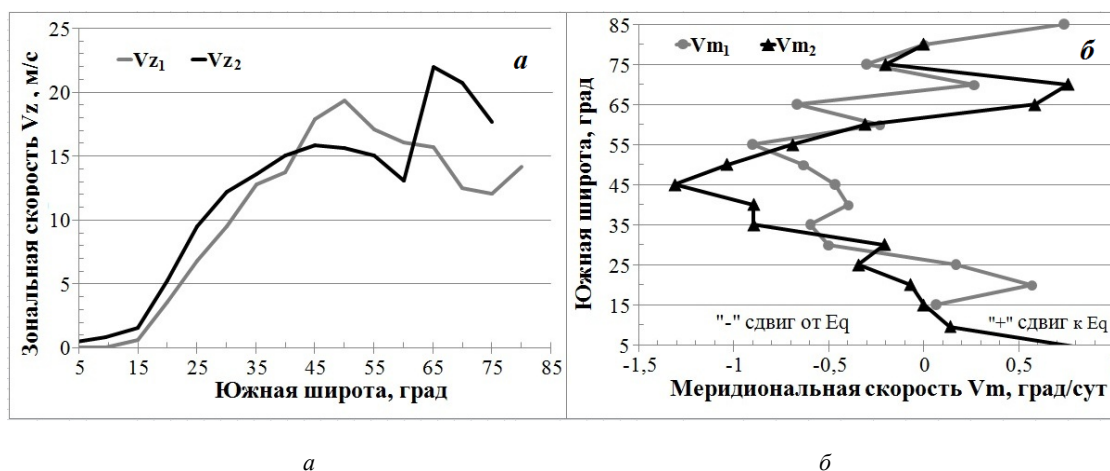


Рис. 2. Зональные (а) и меридиональные (б) скорости озона в сентябре 2014 и 2015 г.

На рис. 1 видно, что тренды  $y(V)_1$  и  $y(V)_2$  практически совпадают с 1 января по 20 июля, их существенное различие наблюдается в августе–ноябре. В сентябре, максимальные значения трендов наблюдаются с временным сдвигом 19 дней. В октябре 2015 г. зональная скорость циркумполярного вихря, в среднем, в 1,4 раза выше скорости этого планетарного вихря, определенной в аналогичный период 2014 г. В ноябре 2015 г. зональная скорость ЦВ больше скорости данного вихря, наблюдаемой в ноябре 2014 г. – в 1,8 раза.

Консервативный озон является атмосферным индикатором движения воздушных масс. По спутниковым данным OMI/AURA с помощью метода атмосферного трассера (озона), описанного в [1] и основанного на экстремально-корреляционном алгоритме, нами рассчитаны зональные и меридиональные скорости озона в стратосфере Южного полушария за каждый весенний месяц исследуемого периода. На рис. 2 в качестве примера показаны графики зональных и меридиональных скоростей озона в ЮП в сентябре, во время активного формирования планетарной аномалии над Антарктикой.

На рис. 2, а представлены графики скоростей озона  $V_{z1}$  и  $V_{z2}$ , характеризующие его зональное движение в ЮП в сентябре 2014 и 2015 г., соответственно. Вид-

но, что в сентябре 2015 г. наблюдаемое зональное движение озона в умеренных и приполярных широтах аномально. Максимальные значения скорости  $V_{z2}$  имеет в кольце ЦВ, на  $45^\circ$  ю.ш., и на  $65^\circ$  ю.ш., в области озоновой дыры. В первом случае скорость  $V_{z2} = 15,9$  м/с, а во втором –  $V_{z2} = 22,1$  м/с. В [1] отмечается, что при увеличении зональной скорости озона происходит уменьшение ОСО в Антарктической озоновой дыре, что и наблюдается здесь весной 2015 г.

На рис. 2, б видно, что в сентябре 2015 г. межширотный перенос озона в зоне  $10\text{--}45^\circ$  ю.ш. обусловлен, в основном, притоком озона от экватора (Eq) в кольцо ЦВ. Меридиональный перенос озона в зоне  $65\text{--}70^\circ$  ю.ш. направлен от полюса к Eq, т. е. озон из полярной области стал активно поступать в эти широты. Уже к 4 октября 2015 в планетарной аномалии минимальное ОСО составило 101 е. д., а дефицит масс озона – 33,72 млн т [6].

В [4] указывается, что одной из вероятных причин существенного уменьшения озона весной 2015 г. в планетарной аномалии Южного полушария является воздействие на озоновый слой продуктов извержения вулкана Кальбуко (Чили). Полученные нами результаты согласуются с выводами [3] о том, что в весенний период 2015 г. при формировании Антарктической озоновой дыры циркуляционные условия

повлияли на распределение озона как в умеренных широтах, так и в полярной области.

#### Библиографические ссылки

1. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г. Стратосферный озон: вид с комической орбиты : монография. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.
2. NASA [Электронный ресурс]. URL: <https://jwocky.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 02.03.2019).
3. Zuev V. V., Savelieva E. S., Parezheva T. V. Study of the Possible Impact of the Calbuco Volcano Eruption on the Abnormal Destruction of Stratospheric Ozone over the Antarctic in Spring // *Journal Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol. 31, № 6. P. 665–669.
4. The influence of the Calbuco eruption on the 2015 Antarctic ozone hole in a fully coupled chemistry-climate model / D. J. Ivy, S. Solomon, D. Kinnison et al. // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 2556–2561.
5. Mohanakumar K. *Stratosphere Troposphere Interactions*. Berlin : Springer, 2008. 452 p.
6. Ozone Watch. NASA. [Электронный ресурс] URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 23.05.2019).

#### References

1. Kashkin V. B., Rubleva T. V., Hlebopros R. G. [Stratospheric ozone: view from space orbit]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2015. 184 p.
2. NASA [Electronic resource]. URL: <https://jwocky.gsfc.nasa.gov> (accessed: 02.03.2019).
3. Zuev V. V., Savelieva E. S. and Parezheva T. V. [Study of the Possible Impact of the Calbuco Volcano Eruption on the Abnormal Destruction of Stratospheric Ozone over the Antarctic in Spring]. *Journal Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015. Vol. 31, № 6. P. 665–669.
4. The influence of the Calbuco eruption on the 2015 Antarctic ozone hole in a fully coupled chemistry-climate model / D. J. Ivy, S. Solomon, D. Kinnison et al. // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 2556–2561.
5. Mohanakumar K. [Stratosphere Troposphere Interactions]. Berlin : Springer, 2008. 452 p.
6. Ozone Watch. NASA [Electronic resource]. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (accessed: 23.05.2019).

© Кашкин В. Б., Рублева Т. В.,  
Шеляпина К. В., 2019

## ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА ИНТЕРВАЛОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ЗНАЧЕНИЙ МНОГОМЕРНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ\*

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. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*Рассматривается метод дискретизации области значений многомерной случайной величины по результатам анализа асимптотических свойств регрессионной оценки плотности вероятности.*

*Ключевые слова: многомерная гистограмма, плотность вероятности, дискретизация области значений случайных величин, выбор длины интервала, правило Скотта.*

## SELECT THE NUMBER OF INTERVALS DISCRETIZING THE RANGE OF VALUES OF A MULTIDIMENSIONAL RANDOM VARIABLE

A. V. Lapko<sup>1,2\*</sup>, V. A. Lapko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computer Modeling Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*The method of discretization of the region of values of a multidimensional random variable based on the results of the analysis of asymptotic properties of the regression estimation of probability density is considered.*

*Keywords: multivariate histograms, probability density, sampling the range of values of a random variable, bin width selection, Scott's rule.*

Проблема дискретизации области значений случайных величин возникает при проверке статистических гипотез с использованием критерия Пирсона, формировании алгоритмов автоматической классификации и распознавания образов в условиях статистических данных большого объема. Эффективное решение отмеченных задач имеет важное значение при обработке данных дистанционного зондирования природных объектов [1–3].

Для выбора количества интервалов дискретизации области значений многомерной случайной величины используются эвристические рекомендации. Количество многомерных интервалов дискретизации предлагается определять из условия, чтобы минимальное число наблюдений случайной величины попадающих в один интервал соответствовало числам 3, 5, 10. Известны формулы дискретизации многомерной случайной величины, полученные на основе анализа асимптотических свойств гистограммы [4]. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации одномерной и двухмерной случайных величин предложен в исследованиях [5–8]. Обобщим полученные результаты на решение задачи дискретизации области значений многомерной случайной величины.

В работе [9] для восстановления плотности вероятности многомерной случайной величины  $x = (x_v, v = \overline{1, k})$  в условиях выборок  $V = (x_1^i, \dots, x_k^i, i = \overline{1, n})$  большого объема  $n$  предложена её непараметрическая оценка

$$\bar{p}(x_1, \dots, x_k) = \frac{1}{\prod_{v=1}^k c_v} \sum_{j=1}^N \bar{P}^j \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - z_v^j}{c_v}\right). \quad (1)$$

Синтез статистики (1) предполагает декомпозицию области значений случайной величины  $x = (x_1, \dots, x_k)$  на  $N$  многомерных интервалов с центрами  $z^j = (z_v^j, v = \overline{1, k})$ . Далее определяются соответствующие им частоты  $\bar{P}^j, j = \overline{1, N}$ . Тогда исходная выборка  $V$  преобразуется в данные  $\bar{V} = (\bar{P}^j, z^j, j = \overline{1, N})$ , по которым оценивается плотность вероятности  $p(x_1, \dots, x_k)$  в виде (1).

\*Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 18-01-00251.

Ядерные функции  $\Phi(u_v)$  в статистике (1) удовлетворяют условиям положительности, симметричности и нормированности.

Для одномерной случайной величины из условия минимума асимптотического выражения среднеквадратического отклонения статистики (1) при  $k = 1$  получена формула выбора оптимального количества интервалов дискретизации

$$N_1^* = \left( n \Delta \int_{-\infty}^{+\infty} p^2(x) dx \right)^{1/2} = \alpha_1 \sqrt{n}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – длина интервала значений случайной величины  $x$ .

Оптимальное количество интервалов дискретизации области значений двумерной случайной величины определяется формулой

$$N_2^* = \left( \frac{3}{4} n \Delta_1 \Delta_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p^2(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \right)^{1/2} = \alpha_2 \sqrt{n}. \quad (3)$$

Анализ результатов (2), (3) создаёт основу их обобщения на многомерный случай. Следуя методу аналогий, предлагается следующая формула дискретизации многомерной случайной величины

$$N_k^* = \left( \alpha(k) n \prod_{v=1}^k \Delta_v \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p^2(x_1, \dots, x_k) dx_1 \dots dx_k \right)^{1/2} = \alpha_k \sqrt{n}. \quad (4)$$

Анализируя формулы (2), (3), нетрудно заметить, что значения  $\alpha(k) = (2k-1)/k^2$ . При  $k = 1$  значение  $\alpha(1) = 1$ , если  $k = 2$ , тогда  $\alpha(2) = 3/4$ , что согласуется с формулами (2), (3).

#### Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы оценивания состояний природных объектов // *Автометрия*. 2018. Т. 54, № 5. С. 33–39.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Информационная система оценивания состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования на основе непараметрических алгоритмов принятия решений // *Информатика и системы управления*. 2019. Т. 59, № 1. С. 106–117.
3. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномерным 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.
4. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 384 p.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценивании плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2013. № 7. С. 24–27.
6. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значе-

ний двумерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2016. № 2. С. 14–17.

7. Лапко А. В., Лапко В. А. Сравнение эффективности методов дискретизации области значений зависимых случайных величин при синтезе непараметрической оценки двумерной плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2017. № 4. С. 15–18.

8. Лапко А. В., Лапко В. А. Метод дискретизации области значений многомерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2019. № 1. С. 16–20.

9. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка многомерной плотности вероятности и её свойства // *Автометрия*. 2014. Т. 50, № 2. С. 50–56.

#### References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric algorithms for estimating the states of natural objects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54, № 5. P. 451–456.
2. Lapko A. V., Lapko V. A. [Information system for natural objects state estimation according to remote sensing data based on nonparametric decision-making algorithms]. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2019. Vol. 59, № 1. P. 106–117 (In Russ).
3. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables / A. V. Lapko, V. A. Lapko, S. T. Im et al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. P. 230–236.
4. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. New Jersey, John Wiley & Sons Publ., 2015. 384 p.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density. *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56, № 7. P. 763–767.
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, № 2. P. 122–126.
7. Lapko A. V., Lapko V. A. Comparison of the efficiency of methods of digitizing the range of values of dependent random variables during synthesis of a nonparametric assessment of two-dimensional probability density. *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 60, № 4. P. 325–330.
8. Lapko A. V., Lapko V. A. Discretization method for the range of values of a multi-dimensional random variable. *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 1. P. 16–22.
9. Lapko A. V., Lapko V. A. Regression estimate of the multidimensional probability density and its properties. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2014. Vol. 50, № 2. P. 148–153.

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2019



УДК 519.7

## ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗМЫТОСТИ В МНОГОМЕРНЫХ ЯДЕРНЫХ ОЦЕНКАХ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

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. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*Предлагается методика быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической оценке многомерной плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена.*

*Ключевые слова: непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности, выбор коэффициентов размытости, оценка Розенблатта–Парзена, быстрый алгоритм оптимизации, асимптотические свойства, многомерный анализ данных.*

## BANDWIDTH SELECTION IN MULTIDIMENSIONAL KERNEL ESTIMATES OF PROBABILITY DENSITY AT STATISTICAL DATA OF LARGE VOLUME

A. V. Lapko<sup>1,2\*</sup>, V. A. Lapko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computer Modeling Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*Proposed fast technique bandwidth selection for kernel function in multidimensional nonparametric density estimation of the Rosenblatt–Parzen type.*

*Keywords: multidimensional nonparametric density estimation, bandwidth selection, Rosenblatt–Parzen estimate, fast optimization algorithm, asymptotic properties, multivariate data analysis.*

Непараметрическая оценка плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена  $\bar{p}(x_1, \dots, x_k)$  успешно используется при синтезе алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования [1–3]. Вычислительная эффективность традиционных процедур оптимизации  $\bar{p}(x_1, \dots, x_k)$  значительно снижается с ростом объема  $n$  статистических данных  $V = (x_1^i, \dots, x_k^i, i = \overline{1, n})$ . Разработки быстрых процедур оптимизации непараметрических статистик уделяется значительное внимание [4–8].

В данной работе развивается и обосновывается быстрый алгоритм выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической оценке плотности вероятности многомерных случайных величин, основанный на принципах коллективного оценивания с использованием информации тестового семейства плотностей вероятности.

Для восстановления плотности вероятности многомерной случайной величины  $p(x_1, \dots, x_k)$  по выборке  $V$  ее независимых наблюдений рассмотрим статистику

$$\bar{p}(x_1, \dots, x_k) = \left( n \prod_{v=1}^k c \sigma_v \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \prod_{v=1}^k \Phi \left( \frac{x_v - x_v^i}{c \sigma_v} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_v$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины  $x_v$ ,  $v = \overline{1, k}$ . Ядерные функции  $\Phi(u_v)$  удовлетворяют условиям положительности, симметричности и нормированности.

В работе [8] из условия минимума асимптотического выражения среднее квадратическое отклонение  $\bar{p}(x_1, \dots, x_k)$  от плотности вероятности  $p(x_1, \dots, x_k)$  определено оптимальное значение параметра  $c$  статистики (1)

$$c^* = \left( k \left( \|\Phi(u)\|^2 \right)^k / \left( n B \prod_{v=1}^k \sigma_v \right) \right)^{1/(k+4)}, \quad (2)$$

где

$$\|\Phi(u_v)\|^2 = \|\Phi(u)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi^2(u) du,$$

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \sum_{v=1}^k \sigma_v^2 p_v^{(2)}(x_1, \dots, x_k) \right)^2 dx_1 \dots dx_k.$$

С учётом выражения (2) определим оптимальные коэффициенты размытости ядерных функций в виде

$$c_v^* = c^* \sigma_v = \beta \sigma_v n^{-1/(k+4)}, \quad v = \overline{1, k}, \quad (3)$$

где

$$\beta = \left( k \left( \|\Phi(u)\|^2 \right)^k / \left( B \prod_{v=1}^k \sigma_v \right) \right)^{1/(k+4)}.$$

Если случайные величины  $x_v$ ,  $v = \overline{1, k}$  являются независимыми и составляющие  $p(x_v)$  плотности вероятности  $p(x_1, \dots, x_k)$  определяются математическим ожиданием и дисперсией, то при конкретных ядерных функциях значения  $\beta$  являются константами. В этих условиях значения  $\beta$  не зависят от параметров  $p(x_1, \dots, x_k)$ . Например, для широкого семейства симметричных законов распределения  $x = (x_1, \dots, x_k)$  значения  $\beta \in (0,645; 1,295)$  для ядерной функции В. А. Епанечникова.

Для быстрого выбора коэффициентов размытости в статистике (1) используется формула (3) в которой  $\sigma_v$ ,  $v = \overline{1, k}$  оцениваются по выборке  $V$ , а значения  $\beta$  определяется как среднее  $\bar{\beta}$  значений  $\beta$  тестового семейства плотностей вероятности. По результатам вычислительных экспериментов установлено, что при погрешности в оценивании  $\beta$  в два раза среднеквадратическая ошибка аппроксимации  $p(x_1, \dots, x_k)$  статистикой (1) не превышает 10 %. При этом вычислительная эффективность процедуры оптимизации статистики (1) повышается на порядки, что является важным при обработке больших массивов статистических данных.

#### Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы оценивания состояний природных объектов // *Автометрия*. 2018. Т. 54, № 5. С. 33–39.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Информационная система оценивания состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования на основе непараметрических алгоритмов принятия решений // *Информатика и системы управления*. 2019. Т. 59, № 1. С. 106–117.
3. 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.

4. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 384 p.

5. Chen S. Optimal bandwidth selection for kernel density functionals estimation // *Journal of Probability and Statistics*. 2015. Vol. 2015. P. 1–21.

6. Sheather S. J. *Density Estimation* // *Statistical Science*. 2004. Vol. 19, № 4. P. 588–597.

7. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый алгоритм выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической оценке плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2018. № 6. С. 16–20.

8. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый алгоритм выбора коэффициентов размытости в многомерных ядерных оценках плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2018. № 10. С. 19–23.

#### References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric algorithms for estimating the states of natural objects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54, № 5. P. 451–456.
2. Lapko A. V., Lapko V. A. [Information system for natural objects state estimation according to remote sensing data based on nonparametric decision-making algorithms]. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2019. Vol. 59, № 1. P. 106–117 (In Russ).
3. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables / A. V. Lapko, V. A. Lapko, S. T. Im et al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. P. 230–236.
4. Scott D. W. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. New Jersey, John Wiley & Sons Publ., 2015. 384 p.
5. Chen S. Optimal bandwidth selection for kernel density functionals estimation. *Journal of Probability and Statistics*. 2015. Vol. 2015. P. 1–21.
6. Sheather S. J. *Density Estimation*. *Statistical Science*. 2004. Vol. 19, № 4. P. 588–597.
7. Lapko A. V., Lapko V. A. Fast algorithm for choosing kernel function blur coefficients in a nonparametric probability density estimate. *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 61, № 6. P. 540–545.
8. Lapko A. V., Lapko V. A. Fast algorithm for choosing blur coefficients in multidimensional kernel probability density estimates. *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 61, № 10. P. 979–986.

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2019

## РАДИОСКОПИЯ ЛЕСА СИГНАЛАМИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ДИАПАЗОНА L1

Д. С. Макаров\*, Д. В. Харламов, А. В. Сорокин

Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50  
\*E-mail: ikivt@yandex.ru

*Рассмотрены варианты радиоскопии леса сигналами навигационных спутников с целью восстановления структурных характеристик отдельных деревьев. Используются стационарные приемники с возможностью изменений места размещения относительно высоты дерева и границ кроны. Получены «теневые» проекции контуров крон и стволов. Показана возможность оценки объемного распределения древесины в кронах.*

*Ключевые слова: сигналы навигационных спутников, радиоскопия кроны, объемное распределение древесины.*

## RADIOSCOPY OF FOREST BY L1 BAND SIGNALS OF NAVIGATION SATELLITES

D. S. Makarov\*, D. V. Kharlamov, A. V. Sorokin

Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
\*E-mail: ikivt@yandex.ru

*The variants of forest radioscopia by signals of navigation satellites are considered with the aim of restoring the structural characteristics of individual trees. Stationary receivers are used with the possibility of changing the location relative to the height of the tree and the boundaries of the crown. The “shadow” projections of the contours of the crowns and trunks are obtained. The possibility of estimating the volume distribution of wood in crowns is shown.*

*Keywords: signals of navigation satellites, radioscopia, forest, volume distribution of wood.*

Сигналы навигационных спутников (НС) в лесу взаимодействуют с разномасштабными элементами деревьев, поглощаются и рассеиваются [1–3]. Длина волны диапазона L1 сравнима и меньше характерных размеров стволов и заметно больше диаметров большей части ветвей, и размеров листьев и хвои. Объем пространства крон, заполненный мелкомасштабными элементами дерева, является достаточно однородной поглощающей средой. Мощность сигнала, регистрируемого приемником, изменяется по экспоненциальному закону с показателем, пропорционально протяженности кроны и объемной плотности древесины. Сигналы, прошедшие кроны в разных направлениях, регистрируются приемником и позволяют определить коэффициенты погонного ослабления в кронах [4].

Радиопросвечивание крон сигналами навигационных систем GPS, ГЛОНАСС антенной, расположенной вблизи отдельного дерева, позволяет в течение 2–4 часов получить данные об пространственном распределении плотности древесины, листьев или хвои.

Тестовые измерения для получения «теневого» портрета двух близко расположенных елей вблизи здания Института физики проведены с вариациями расположения антенны на двух высотах 6 и 9 м и ортогональным расположением относительно друг друга. Получены массивы данных о сигналах НС, просвечивающих кроны в различных сечениях. Горизонтальная схема размещения антенн представлена на рис. 1.

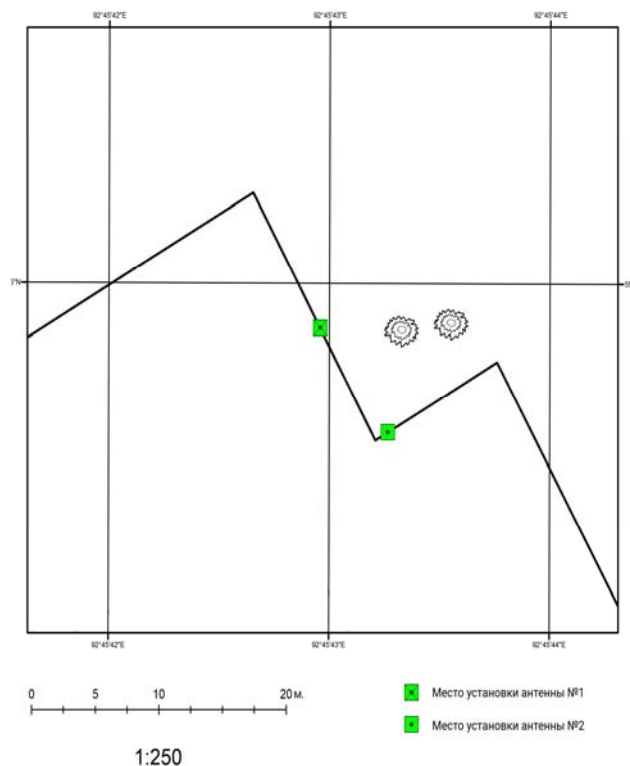


Рис. 1. Горизонтальная схема размещения антенн

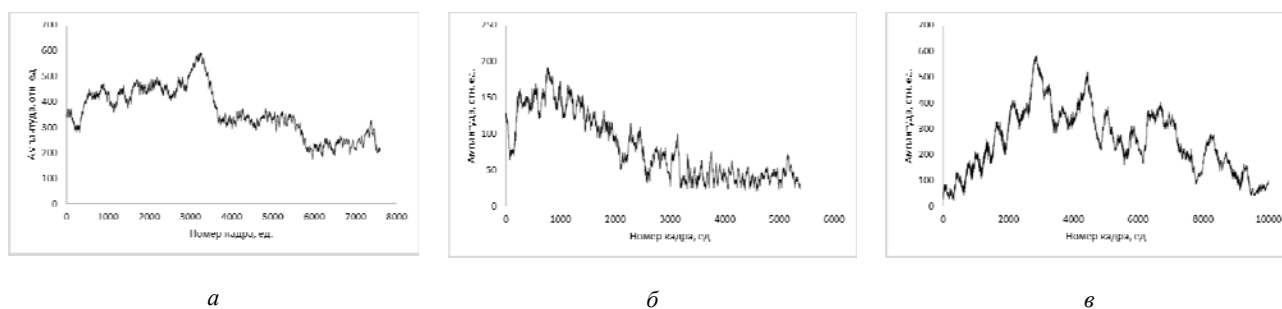


Рис. 2. Результаты регистрации сигналов НС в различных точках размещения:  
 а – место 1 – GPS 18, высота 9 м; б – место 2 – GPS 17, высота 6 м; в – место 1 – GPS 27, высота 6 м

Зондирующий сигнал НС сканировал кроны елей в интервале углов азимута распространения сигнала 60–100° и угла возвышения от 30° и 10° для расположения антенны на высотах соответственно 6 м и 9 м. Примеры вариаций пространственно-временных зависимостей сигналов представлены на рис. 2.

Вариации амплитуды регистрируемых сигналов связаны с пространственным распределением эффективной диэлектрической проницаемостью дерева, зависящей от объемных долей древесинного вещества в стволе с кроной и воздуха. Использование «теневых» проекций и методов радиотомографии дает возможность восстановить пространственную структуру древостоя и его состояние.

#### Библиографические ссылки

1. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 392 с.
2. Сорокин А. В., Подопригра В. Г., Макаров Д. С. Рассеяние сигналов навигационных спутников на пространственных неоднородностях леса // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 416–417.
3. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / В. Б. Кашкин, В. И. Кокорин, В. Л. Миронов и др. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 7. С. 825–830.
4. Пат. 2 682 718 Российской Федерации. МПК G01S 19/03 (2010.01) Способ определения коэффици-

ентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой / Макаров Д. С., Савин И. В., Сорокин А. В., Фомин С. В. Харламов Д. В. № 2018119448; заявл. 25.05.2018 ; опубли. 21.03.2019, Бюл. № 9. 8 с.

#### References

1. Popov V. I. Rasprostraneniye radiovoln v lesakh [Propagation of radio waves in forests]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015, 392 p.
2. Sorokin A. V., Podoprigora V. G., Makarov D. S. [Scattering of navigation satellite signals on the spatial heterogeneities of a forest]. Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. “Reshetnevskie chteniya” [Materials XXI Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2017. P. 416–427 (In Russ.).
3. Kashkin V. B., Kokorin V. I., Mironov V. L., Sizasov S. V. [Eksperimentalnoe opredelenie elektrofizicheskikh parametrov lesnogo pokrova s ispolzovaniem signalov globalnykh navigatsionnykh sistem GLONASS i GPS] // Radiotekhnika i Elektronika. 2006. T. 51, № 7. P. 825–830 (In Russ.).
4. Sorokin A. V. et al. Sposob opredeleniya koeffitsiyentov pogonnogo oslableniya signalov navigatsionnykh kosmicheskikh apparatov v lesnom massive s koordinatnoy privyazkoy [Method for determining linear attenuation coefficients of navigation spacecraft signals in a forest with coordinate reference]. Patent RF, no. 2018119448, 2019. № 9. P. 8.

© Макаров Д. С., Харламов Д. В., Сорокин А. В., 2019

## ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Ю. В. Платонова, О. Ю. Комиссарова

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

*Экологические проблемы городов связаны с интенсивным влиянием человека на природу. Дистанционные методы в экологическом мониторинге снежного покрова – эффективный способ оперативного контроля за загрязняющими веществами.*

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, экология, мониторинг, городская среда, снежный покров, токсичность.*

### REMOTE METHODS FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF SNOW COVER POLLUTION

Yu. V. Platonova, O. Yu. Komissarova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: platonovay@mail.ru

*The environmental problems of cities are related to the intense influence of man on nature. Remote methods in the environmental monitoring of snow cover are an effective way to control pollutants promptly.*

*Keywords: remote sensing, ecology, monitoring, urban environment, snow cover, toxicity.*

Мониторинг окружающей среды – это система постоянного наблюдения и регулярного контроля окружающей природной среды, анализа всех происходящих в ней процессов, а также заблаговременного выявления возможных тенденций ее изменения. Наибольшую актуальность имеет экологический мониторинг антропогенных изменений. Хозяйственная деятельность и техногенное воздействие человечества на окружающую его природную среду носят опасный и агрессивный характер [1].

Урбанизация стала причиной развития интенсивного импактного загрязнения городской среды. Состояние окружающей среды крупных городов обычно оценивается по состоянию: атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почв и растительного покрова, здоровья горожан. Наиболее динамичной и наиболее сложной для анализа является атмосфера, которая оказывает существенное влияние на состояние всех компонентов экосистемы. Для мониторинга атмосферы можно использовать различные объекты и методы анализа, каждый из которых имеет свои ограничения и достоинства [4].

Снежный покров является хорошим показателем сезонных зимних загрязнений и индикатором распространения загрязняющих веществ вокруг населенных пунктов [3]. Также он позволяет решить проблему количественного определения суммарных параметров загрязнения (сухих и мокрых выпадений), так как является их естественным накопителем [2].

Для определения качественного и количественного состава загрязняющих веществ в снежном покрове приоритетнее использовать биологический метод анализа, а в качестве тест-объекта использовать инфузорию *Paramecium caudatum* и определять их выживаемость. Для оценки острого токсического воздейст-

вия на тест-объект использовался метод индивидуальных (параллельных) линий парамеций. Достоверность различий контрольных и опытных вариантов оценивалась по критерию Стьюдента и по индексу токсичности ( $T_i$ ).

Индекс токсичности определяется по формуле

$$T_i = \frac{J_k - J_o}{J_k}$$

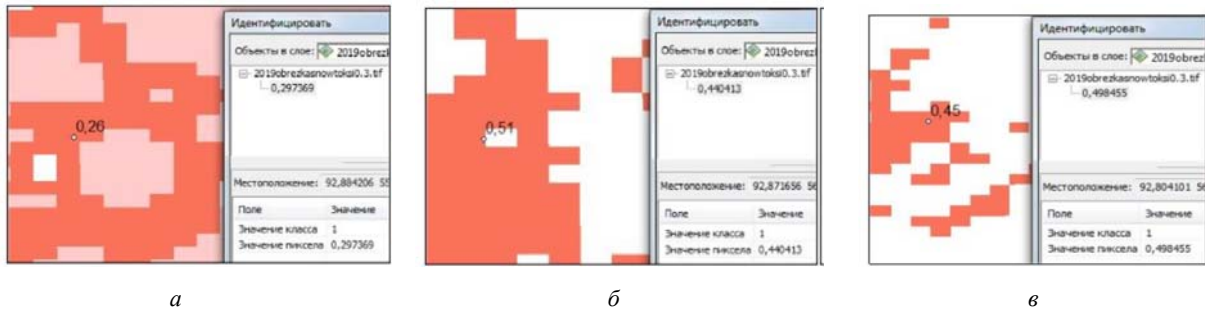
где  $T_i$  – индекс токсичности;  $J_k$  – контрольные показания;  $J_o$  – опытные показания.

Порог допустимой токсичности при  $0,00 < T_i < 0,25$ , умеренной  $0,26 < T_i < 0,70$ , высокой  $T_i > 0,71$ .

В исследовании использовались космические снимки, взятые из архива Геологической службы США (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Для выявления возможности использования данных дистанционного зондирования были проведены полевые экспедиции отбор проб снежного покрова. Пробы отбирались на территории ряда рекреационных зон г. Красноярск в феврале 2019 г.: о. Отдыха, сквер Чернышевского, парк «Троя».

Проанализирован ряд проб снежного покрова скверов и парков, расположенных на территории города Красноярск, по реакции выживаемости и смертности инфузории *Paramecium caudatum*. Для извлечения спектральных характеристик в точках отбора проб снежного покрова использовался программный пакет ArcGis.

С помощью инструмента «Извлечь мультимасштабные значения в точки (Spatial Analyst)» были извлечены значения яркости ячеек в местоположениях, указанных в классе точечных объектов, из растров и записаны значения в таблицу атрибутов класса точечных объектов.



Точки отбора проб:

а – о. Отдыха; б – сквер Чернышевского; в – парк «Троя»

В качестве входных данных указан растр территории исследования и точечный объект, характеризующий местоположение точек отбора проб снежного покрова. Инструменты извлечения пространственных и спектральных профилей из мультиспектральных и гиперспектральных снимков предоставляют новые пути для анализа многомерных данных.

Под анализом многомерных данных понимается построение и исследование математических моделей данных, т. е. математических зависимостей, которые показывают, как данные преобразуются в различных системах и физических процессах. Достоверность сопряженности варьирования признаков оценивалась в программном пакете Microsoft Office Excel с помощью линейного коэффициента корреляции Пирсона, отражающего взаимную связь двух признаков при их изменчивости.

Анализ полученных корреляционных матриц показал зависимость спектральных характеристик каналов и показателя токсичности снежного покрова с коэффициентами корреляции. Для выделения участков покрытых снегом на космическом снимке Landsat была проведена классификация с обучением методом максимального правдоподобия. Под процессом классификации изображения понимается процесс количественного отбора данных из изображения и группирования точек или частей изображения в классы, предназначенные для представления различных физических объектов или типов.

Для проведения классификации изображений с обучением используются спектральные сигнатуры, полученные из обучающих выборок. С помощью панели инструментов Классификация изображений (Image Classification) в программном пакете ArcGis, созданы обучающие выборки, соответствующим классам и создан из обучающих выборок файл сигнатур, который будет использоваться для дальнейшей классификации изображений.

В точке отбора пробы снежного покрова о. Отдыха показатель токсичности на примере выживаемости инфузории *Paramecium caudatum* равен 0,26, а по построенной картосхеме равен 0,30. Этот показатель лежит в границах доверительного интервала, и, следовательно, данная оценка является правильной (достоверной) (см. рисунок, а).

В точке отбора пробы снежного покрова сквер Чернышевского показатель токсичности на примере выживаемости инфузории *Paramecium caudatum* ра-

вен 0,51, а по построенной картосхеме равен 0,44. Этот показатель лежит в границах доверительного интервала, и, следовательно, данная оценка является правильной (достоверной) (см. рисунок, б).

В точке отбора снежного покрова парк «Троя» показатель токсичности на примере выживаемости инфузории *Paramecium caudatum* равен 0,45, а по построенной картосхеме равен 0,50. Этот показатель лежит в границах доверительного интервала, и, следовательно, данная оценка является правильной (достоверной) (см. рисунок, в).

Таким образом, по полученным результатам можно сделать вывод о том, что оценки точек отбора проб удовлетворяют полученным интервалам достоверности построенной модели токсичности снежного покрова.

#### Библиографические ссылки

1. Вольман В. В. Организация мониторинга территорий с различной антропогенной нагрузкой: курсовая работа / Московский политехнический университет. 2017. 17 с.
2. Бельдеева Л. Н. Экологический мониторинг : учеб. пособие. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. 122 с.
3. Демиденко Г. А., Владимиров Д. С. Оценка антропогенного загрязнения снежного покрова левобережья г. Красноярск // Вестник КрасГАУ. 2014. № 9. С. 120–124.
4. Ларина Н. С., Куранова М. Н., Палецких Н. С. Химико-экологический мониторинг снегового покрова города Тюмени // Успехи современного естествознания. Тюмень. 2006. № 11. С. 38–41.

#### References

1. Volman V. V. Organization of monitoring of territories with different anthropogenic load: course work / Moscow Poly-Technical University. 2017. 17 p.
2. Beldeeva L. N. Environmental Monitoring: Tutorial. Barnaul : AltGTU, 1999. 122 p.
3. Demidenko G. A., Vladimirov D. S. Assessment of anthropogenic pollution of snow in the roof of the left bank of Krasnoyarsk // West-nick KrasGAU. 2014. № 9. P. 120–124.
4. Larina N. S., Kuranova M. N., Paletskii N. S. Chemical-ecological monitoring of snow cover of the city of Tyumen // Successes of Soviet natural science. – Tyumen. 2006. № 11. P. 38–41.

© Платонова Ю. В., Комиссарова О. Ю., 2019

УДК 004.93

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ\*

В. П. Тубольцев\*, В. Л. Авдеенок

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
\*E-mail: vityalya.98@mail.ru

*Исследуется зависимость свойств непараметрического алгоритма автоматической классификации больших массивов данных дистанционного зондирования от параметров дискретизации области их значений.*

*Ключевые слова: автоматическая классификация, большие выборки, дискретизация области значений многомерных случайных величин, данные дистанционного зондирования, лесные массивы.*

## NONPARAMETRIC ALGORITHM OF AUTOMATIC CLASSIFICATION AND ITS APPLICATION IN THE PROCESSING OF REMOTE SENSING DATA

V. P. Tuboltsev\*, V. L. Avdeenok

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: vityalya.98@mail.ru

*The dependence of the properties of a non-parametric algorithm for the automatic classification of large arrays of remote sensing data on the discretization parameters of the region of their values is investigated.*

*Keywords: automatic classification, big data, discretization of value area multidimensional random variables, remote sensing data, woodlands.*

Непараметрические алгоритмы автоматической классификации, основанные на оценках плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена, являются одним из активно развивающихся направлений теории распознавания образов. Эти методы основаны на обнаружении подмножеств наблюдений, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности с использованием их непараметрических оценок парзеновского типа. При этом существуют трудности восстановления многомерных плотностей вероятности и процедур выделения областей, соответствующих классам.

В работах [1; 2] обоснована возможность решения задачи автоматической классификации в рамках задачи распознавания образов с помощью итерационной процедуры последовательного непараметрического оценивания байесовских уравнений разделяющих поверхностей между классами. Полученные результаты развиты при разработке непараметрических систем автоматической классификации статистических данных большого объема для обнаружения подмножеств наблюдений, соответствующих несимметричным одномодальным фрагментам плотности вероятности распределения признаков анализируемых объектов. В данном исследовании проводится анализ зависимости свойств непараметрического алгоритма автоматической классификации данных дистанционного зондирования от параметров дискретизации области их значений.

Непараметрический алгоритм автоматической классификации больших массивов статистических данных рассмотрен в работе [3]. Его синтез основан на декомпозиции исходных данных [4; 5]. Результаты декомпозиции образуют множество центров многомерных интервалов и соответствующие им частоты встречаемости значений случайных величин [6]. На основе полученной информации обнаруживаются классы, соответствующие одномодальным фрагментам плотности вероятности признаков анализируемых объектов.

Рассмотрим применение непараметрического алгоритма автоматической классификации при обработке информации дистанционного зондирования и зависимость получаемых результатов от параметров дискретизации области значений спектральных данных. Изучаемая территория соответствовала горной лесотундре, расположенной в западной части Алтае-Саянского региона (50°03' северной широты, 85°15' восточной долготы) на высоте 2273 метра над уровнем моря (рис. 1). Исходная информация формировалась по фрагменту спутниковой съемки Worldview-2 с пространственным разрешением 0,6 метра. Размер фрагмента составляет 162×192 пикселя, а его площадь равна 1,1 га.

Каждый пиксель характеризовался четырьмя спектральными каналами: синий ( $x_1$ ), зеленый ( $x_2$ ), красный ( $x_3$ ), ближний инфракрасный ( $x_4$ ).

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-01-00251.

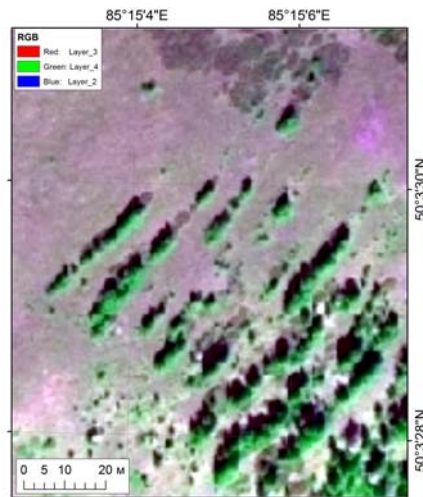


Рис. 1. Фрагмент спутниковой съемки Worldview-2

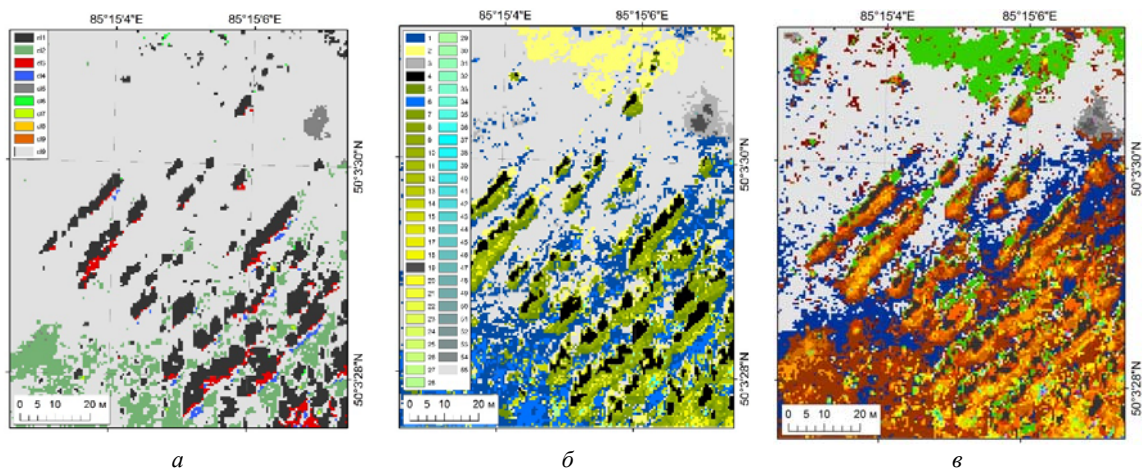


Рис. 2. Пространственное отображение результатов автоматической классификации, полученных с использованием разработанного непараметрического алгоритма

Пространственное отображение на рис. 2, *а* получено при количестве интервалов дискретизации по признаку  $x_1$  равное 9,  $x_2 - 9$ ,  $x_3 - 8$ ,  $x_4 - 8$ . При этом количество классов составило 9. На фрагменте (рис. 2, *б*) количество интервалов дискретизации было увеличено в 2 раза соответственно по сравнению с рис. 1. Количество классов увеличилось до 55. Фрагмент на рис. 2, *в* соответствует тройному увеличению количества интервалов дискретизации по сравнению с рис. 1. В результате было выделено 165 классов.

Непараметрический алгоритм автоматической классификации зависит от количества интервалов дискретизации области значений многомерной случайной величины. Увеличение количества интервалов дискретизации сопровождается ростом количества обнаруживаемых классов, что существенно затрудняет задачу их интерпретации.

#### Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А., Хлопов А. Н. Непараметрический алгоритм автоматической классификации

статистических данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 4. С. 72–78.

2. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрический алгоритм автоматической классификации в условиях статистических данных большого объема // Информатика и системы управления. 2018. Т. 57, № 3. С. 59–70.

3. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномерным 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.

4. Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание параметров формулы оптимальной дискретизации области значений двумерной случайной величины // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 9–13.

5. Лапко А. В., Лапко В. А. Метод дискретизации области значений многомерной случайной величины // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 16–20.

6. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка многомерной плотности вероятности и её свойства // Автометрия. 2014. Т. 50, № 2. С. 50–56.



### References

1. Lapko A. V., Lapko V. A., Khlopov A. N. [Nonparametric algorithm of automatic classification of statistical data]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2011. Vol. 54, № 4. P. 73–79 (In Russ).
2. Lapko A. V., Lapko V. A. [Nonparametric algorithm of automatic classification under conditions of large-scale statistical data]. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2019. Vol. 57, № 3. P. 59–70 (In Russ).
3. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables / A. V. Lapko, V. A. Lapko, S. T. Im et al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. P. 230–236.
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Comparison of the efficiency of methods of digitizing the range of values of dependent random variables during synthesis of a nonparametric assessment of two-dimensional probability density. *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 60, № 4. P. 325–330.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Discretization method for the range of values of a multi-dimensional random variable. *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 1. P. 16–22.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. Regression estimate of the multidimensional probability density and its properties. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2014. Vol. 50, № 2. P. 148–153.

© Тубольцев В. П., Авдеенок В. Л., 2019



**Секция**  
**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

## АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ САМОЛЕТОВ В ВОЗДУХЕ TCAS II И ЕЕ РЕЖИМОВ TA/RA

А. Р. Акзигитов, Д. В. Дмитриев\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
\*E-mail: gerundiy48@gmail.com

*Рассмотрен прибор TCAS II и его режимы. Начало бурного развития гражданской авиации сигнализирует о загруженности воздушного пространства. Сейчас во многих районах мирового воздушного пространства нагрузка возросла многократно, и вполне понятно, что чем больше количество участников движения, тем вероятность их неприятной встречи в определенный момент времени возрастает.*

*Ключевые слова: приближение, столкновения, TCAS, воздушное судно, гражданская авиация.*

## ANALYSIS OF TCAS II AIR COLLISION AVOIDANCE SYSTEM AND ITS TA/RA MODES

A. R. Akzigitov, D. V. Dmitriev\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: gerundiy48@gmail.com

*This article discusses the TCAS II device and its modes. The beginning of the rapid development of civil aviation signals the congestion of the airspace. Now in many areas of the world's airspace, the load has increased many times and it is clear that the more the number of traffic participants, the probability of their unpleasant meeting at a certain point in time increases.*

*Keywords: approach, collision, TCAS, aircraft, civil aviation.*

TCAS II является единственным надежным средством предотвращения столкновений судов в воздухе, поэтому TCAS должна быть постоянно включена в режим TA/RA при выполнении всех полетов с момента занятия исполнительного старта до освобождения ВПП после посадки, за исключением случаев, предписанных РЛЭ воздушного судна или особенностями выполнения полета. В комплект оборудования TCAS входят: компьютерный блок, который просчитывает варианты развития событий и определяет выдаваемые команды, две приемопередающие антенны, устанавливаемые сверху и снизу фюзеляжа, отдельные антенны для S-транспондеров и дисплей-индикатор в кабине. Этот дисплей – индикатор – выдает информацию о перемещении близколетящих самолетов, а также визуальные команды для предотвращения столкновений (RA) [1]. Существует несколько типов индикаторов и вариантов установки. Часто его совмещают с существующими дисплеями (например, бортовым локатором, индикатором вертикальной скорости) или устанавливают отдельно, если кабина ранее была оборудована механическими указателями. Система индикации TCAS II, по сути, объединяет три устройства: указатель вертикальной скорости, прибор обзора воздушной обстановки (метки отслеживаемых самолетов) и блок управления, выдающий рекомендательные команды к действию [2].

Однако TCAS не имеет собственного приемопередатчика и в системе используются так называемые

приемоответчики системы управления воздушным движением АТС (Air Traffic Control or transponders). Транспондер-это приемопередатчик, который посылает свой радиосигнал в ответ на принятый. Эти устройства используют принцип вторичной радиолокации. С помощью приемопередатчик диспетчер идентифицирует воздушное судно и имеет возможность контролировать его движение. В зависимости от своих конструктивных возможностей и условий эксплуатации транспондеры могут работать в различных режимах, и излучаемый ими сигнал может содержать различную информацию. Первый и самый простой – режим А. Каждому воздушному судно Службой Управления Движением (попросту диспетчером) присваивается свой четырехзначный цифровой идентификационный код – squawk code. В режиме А в ответном сигнале транспондера закодирован только сквок, то есть самолет идентифицирован, отметка на экране локатора есть, но никаких других данных (в том числе и о высоте полета) нет [2; 3].

Следующий режим – режим С, в нем уже вместе с кодом в сигнале присутствует информация о высоте полета. Далее, самый продвинутый (все еще говорят интеллектуальный) – режим S. Транспондер, работающий в этом режиме, отвечает избирательно, когда запрашивают именно его, тогда как работающие в режиме А/С отвечают на любой сигнал облучения локатором. Это позволяет уменьшить общее засорение эфира ответами транспондеров. Кроме того в вы-

даваемом ответе на режиме S содержится дополнительная информация, такая как скорость, высота, бортовой номер (позывной) и могут быть также GPS-координаты. TCAS может осуществлять наблюдение за самолетами как в режиме работы транспондеров C, так и в режиме S. Приемопередатчики, работающие в режиме S ежесекундно, излучают самогенерируемые сигналы [3]. В этом сигнале содержится адрес отправителя. По его данным TCAS адресно отправляет запрос и по полученному ответу определяет дальность, курсовой угол (азимут) и высоту контролируемого самолета.

Получаемые данные отправляются в вычислительный блок (компьютер), который, объединяя сведения обо всех воздушных судах, вычисляет степень опасности каждого контролируемого самолета по отношению к борту, на котором установлена система TCAS. Формируется как бы виртуальная объемная карта защищаемого пространства вокруг нашего самолета. Посторонний летательный аппарат, который входит в защищаемую зону, называют самолетом-нарушителем или конфликтующим самолетом. Система одновременно может отслеживать до 30 воздушных судов и для трех одновременно выдавать команды по разрешению конфликтной ситуации. Выдаваемые команды можно разделить на консультативные, их обозначают TA (Traffic Advisory) и команды для непосредственных немедленных действий по предотвращению столкновения RA (Resolution Advisory). TA – это предупредительный сигнал. Он означает, что самолет-нарушитель вошел в защищаемую зону, необходимо усилить внимание и осмотрительность и быть готовым к выдаче команды RA. Никаких активных действий по команде TA не предусматривается [3; 4].

Если компьютер системы, анализируя обстановку, обнаруживает возможность возникновения опасного сближения или столкновения, то он, в соответствии со своей программой, определяет необходимый маневр для того, чтобы обеспечить их безопасное расхождение по высоте. Причем при выборе маневра возможен учет характеристик самолетов (их скороподъемности, в частности) и близость их к земле.

Система TCAS II определяет действия самолета по предотвращению столкновения только в вертикальной плоскости. Для решения проблемы предотвращения столкновения введено понятие точки наибольшего сближения CPA (Closest Point of Approach). Так вот автоматика при выработке рекомендательного алгоритма действий экипажа берет во внимание не расстояние до CPA, а время ее достижения. Оно обычно остается постоянным [4]. Для зоны TA – 35–48 с., для зоны RA – 20–30 с. То есть экипаж вне зависимости от скоростей сближения с самолетом-нарушителем всегда имеет определенный запас времени для осуществления необходимых действий. Визуально команды TA и RA отображаются на индикаторе следующим образом. Отметка самолета-нарушителя, находящегося в зоне TA, – это желтый кружок, в зоне RA – красный квадрат. Так называемые близкорасположенные самолеты (не нарушители), находящиеся на расстоянии до 6 миль и на высотах до 1200 футов (около 360 м) имеют отметку в виде голубого ромба. А на

высотах и расстояниях больше указанных – в виде пустого голубого или белого ромба. Также при выдаче команды RA на указателе вертикальной скорости секторы шкалы окрашиваются в разные цвета. Красный цвет означает, что в этой зоне находиться нельзя, иначе неминуемо произойдет столкновение. Зеленый цвет обозначает рекомендуемые значения вертикальной скорости для гарантированного предотвращения столкновения. Звуковые команды RA можно разделить на корректирующие и предупредительные. Первые предписывают пилоту немедленно изменить траекторию движения в вертикальной плоскости для предотвращения столкновения. Вторые выдают рекомендации пилоту по выдерживанию, либо же неиспользованию определенных вертикальных скоростей [5].

### Библиографические ссылки

1. Захаров Ф. Н., Крутиков М. В. Сравнение точности времени задержки навигационных сигналов при использовании различных моделей высотного профиля индекса преломления // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 2 (32). С. 7–12.
2. Ярликова М. С. Авиационные радионавигационные устройства и системы. М. : ВВИА, 1971. С. 322.
3. Бабай Г. А., Бобнев М. П., Захаренко С. К. Радиоэлектронное оборудование. М. : ВВИА, 1971. С. 320.
4. Белавин О. В. Системы воздушных сигналов: учеб. пособие. М. : Сов. радио, 1977. С. 311.
5. Ярлыков М. С. Статическая теория работы систем сигналов самолетов гражданской авиации. М. : Радио и коммуникация 1985. 344 с.

### References

1. Zaharov F. N., Krutikov M. V. [Comparison of accuracy of navigation signal time delay in different models of refractive index vertical profile]. *Doklady Tomskogogosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioehlektroniki* [Reports of Tomsk state university of control systems and radio electronics]. Tomsk : TUSUR, 2014. P. 7–12 (In Russ.).
2. Yarlykova M. S. Aviationsionnyye radionavigatsionnyye ustroystva i sistemy [Aviation radio navigation devices and systems]. Moscow, VVIA Publ., 1971. 322 p.
3. Babay G. A., Bobnev M. P., Zakharenko S. K. Radioelektronnoye oborudovaniye samoletov [Avionics equipment aircraft]. Moscow, VVIA Publ., 1971. 322 p.
4. Belavin O. V. Sistemy vozdushnykh signalov: Ucheb. posobiye dlya vuzov [Systems of air signals: Studies. the manual for high schools]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1977. 320 p.
5. Yarlykov M. S. Statisticheskaya teoriya raboty sistem signalov samoletov grazhdanskoy aviatsii [Statistical theory of operation of the signaling systems of civil aircraft]. Moscow, Radio andcommunication Publ., 1985. 344 p.

© Акзигитов А. Р., Дмитриев Д. В., 2019

УДК 629.7.03

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВИАДВИГАТЕЛЯ ВЕРТОЛЕТА МИ-8

А. В. Афанасьева, Д. С. Гильманов, Р. В. Балаганский

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: afanasevaav05@gmail.com

*Представлен анализ вероятных отказов агрегатов, узлов и систем газотурбинного двигателя ТВ2-117А вертолёта Ми-8 на протяжении этапов его жизненного цикла, за основу взяты параметры теории надёжности.*

*Ключевые слова: отказ, жизненный цикл, надёжность, двигатель.*

## ASSESSMENT OF TECHNICAL RISKS OF THE LIFE-RELIABILITY SYSTEM OF THE LIFE CYCLE OF THE MI-8 HELICOPTER

A. V. Afanaseva, D. S. Gilmanov, R. V. Balaganskiy

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: afanasevaav05@gmail.com

*The article presents an analysis of the probable failures of units, components and systems of the TV2-117A gas turbine engine of the Mi-8 helicopter during the stages of its life cycle, taking as a basis the parameters of the reliability theory.*

*Keywords: failure, life cycle, reliability, engine.*

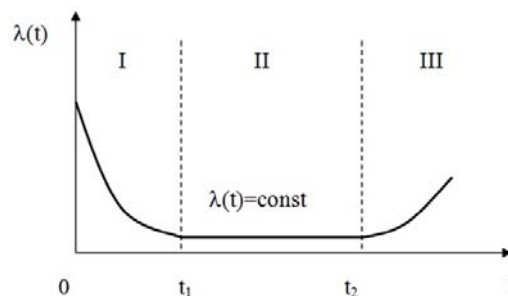
Вертолет – универсальный и многоцелевой летательный аппарат, который не требует специально оборудованной площадки для совершения взлетов и посадок. Рост лётно-технических характеристик вертолётов объясняется применением на них газотурбинных двигателей (ГТД).

В авиационной технике распространены случаи нарушения работоспособности оборудования, вследствие выхода параметров какой-либо системы за рамки допусков. Такое явление называется отказом.

Жизненный цикл авиационного двигателя, определяемый интенсивностью отказов по времени, изображен на рисунке и включает в себя этапы: приработки (участок 1), нормальной эксплуатации (участок 2) и интенсивного изнашивания (участок 3). На первом участке обычно обнаруживаются отказы, связанные с ошибками при сборке и регулировке оборудования. Стоит отметить, что одной из наиболее частых причин отказов аппаратуры в начале эксплуатации является неопытность обслуживающего персонала. На втором участке изображен наиболее длительный период работы аппаратуры с уменьшением частоты отказов, который принято считать периодом нормальной работы. На третьем участке отмечается увеличение интенсивности отказов. Это обусловлено тем, что при длительной эксплуатации оборудования начинается массовый выход из строя элементов вследствие их изнашивания и старения [1].

По опыту эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей выделяют ряд основных или наиболее

часто повторяющихся причин отказов. К таковым относятся: трещины и обрывы лопаток компрессоров и турбин, повреждение лопаток компрессора посторонними предметами, трещины и разрушения дисков, пылевая эрозия элементов проточной части и отложения пыли, разрушение зубьев шестерен, повышенные вибрации двигателей, трещины и прогары жаровых труб камер сгорания, образование нагара на элементах камеры сгорания, потеря газодинамической устойчивости работы компрессора, не запуск двигателя, отказы элементов трансмиссии, узлов опор, системы смазки, отказы элементов топливпитания [2].



Изменение интенсивности отказов во времени

На безотказность ГТД влияют такие основные факторы, как влияние условий применения двигателя, эксплуатационные факторы и стабильность производственного цикла завода-изготовителя и авиаремонтных предприятий.

**Взаимная зависимость между показателями надежности**

Известная функция	Определение трех остальных функций через известную			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	–	$1 - P(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	–	$\frac{dQ(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt}$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t) dt$	$\int_0^t f(t) dt$	–	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	$\lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	–

Рассматриваемый в данной теме вертолет Ми-8 имеет два турбовальных двигателя (ТВаД) ТВ2-117А. Данный двигатель имеет особенность, которая заключается в наличии у него свободной турбины (турбины винта) для привода вала несущего винта вертолета, не связанной кинематически с турбокомпрессорной частью двигателя. Это дает конструктивные и эксплуатационные преимущества в сравнении с другими аналогами двигателя.

На практике приходится иметь дело с причинами отказов ТВ2-117А, связанными с рабочим процессом в основных узлах двигателя, с характером процессов его управления, со статической и динамической прочностью нагруженных деталей, со свойствами элементов, входящих в системы двигателя (такие, как системы смазки, регулирования, топливопитания, зажигания и др.). Немаловажную роль играют особенности производства двигателя и характер его эксплуатации [3].

Теоретически способность изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки выражают, используя такие параметры, как вероятность безотказной работы, частота отказов, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы. Для оценки надежности целого двигателя нужно рассчитать параметры надежности для каждой отдельно взятой его части, узла, агрегата и системы. С этой целью был выведен ряд формул, которые изучаются в курсе теории надежности.

Зная один из показателей надежности, и, используя его соотношения с другими показателями, можно определить остальные зависимости. Представим взаимную зависимость между основными показателями надежности.

В соответствии с Методикой количественной оценки безотказности серийных авиационных двигателей по результатам эксплуатации и по показателям типа «наработки на отказ» выполняется оценка надёжности (безотказности) полётов двигателей [4].

В разработке любого летательного аппарата одной из самых важных задач является наиболее точно и правильно дать оценку технических рисков. Без этой процедуры на сегодняшний день не обойтись. Если выпустить летательный аппарат и не произвести расчетов параметров надежности каждой системы, то с точки зрения безопасности такое изделие не должно быть допущено к эксплуатации.

**Библиографические ссылки**

1. Мусонов В. М., Кацура А. В., Борсоев В. А. Надежность авиационного оборудования : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 19–20.
2. Юнаков Л. П. Основы теории авиационных газотурбинных двигателей : учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2013.
3. Сошин В. М. Техническое описание ГТД ТВ2-117 (для вертолета Ми-8) : учеб. пособие / Самар. гос. аэрокосмич. ун-т. Самара, 2004.
4. Методика количественной оценки безотказности серийных авиационных двигателей по результатам эксплуатации. М. : ФГУП ЦИАМ, 1991. 23 с.

**References**

1. Moshonov V. M., Katsura A. V., Borsoi V. A. Reliability of aviation equipment: studies. the allowance / Sib. state aerocosmic. un-t. Krasnoyarsk, 2016. P. 19–20.
2. Yunakov L. P. Fundamentals of the theory of aviation gas turbine engines : textbook / Balt. gos. tehn. un-t. SPb., 2013.
3. Soshin V. M. Technical description GTE TV2-117 (for mi-8) : studies. manual / Samara state aerospace. univ. Samara, 2004.
4. The method of quantitative evaluation of reliability of serial aircraft engines based on the results of operation. Moscow, FSUE CIAM, 1991. 23 p.

© Афанасьева А. В., Гильманов Д. С., Балаганский Р. В., 2019

УДК 629.7/621.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ ДОСТАВКИ РЕСУРСОВ НА ВАНКОРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ АВИАЦИОННЫМ ТРАНСПОРТОМ

О. Г. Бойко, Т. А. Легкова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: bouko1962@yandex.ru

*Исследован процесс планирования доставки ресурсов. Метод сетевых графиков позволил отыскать проблемы и резервные места процесса планирования. По результатам моделирования и анализа разработаны предложения по совершенствованию процесса.*

*Ключевые слова: доставка ресурсов, планирование, ванкорское месторождение, сетевые графики, критический путь.*

## STUDY OF THE PROCESS EFFICIENCY OF RESOURCES DELIVERY PLANNING TO VANKOR FIELD BY AIRLIFT

O. G. Boyko, T. A. Legkova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: bouko1962@yandex.ru

*The work explores the process of resources delivery planning. The method of network diagrams made it possible to find problems and reserves of the planning process. The paper formulates some proposals of improving process based on the results of modeling and analysis.*

*Keywords: resource delivery, planning, Vankor Field, diagram network, critical path.*

Район месторождений Ванкорского кластера отделен от железнодорожных веток и круглогодичных автодорог, что существенно затрудняет процесс доставки необходимого оборудования, материалов и персонала. Доставка ресурсов осуществляется водным транспортом один месяц в году, по зимним дорогам автотранспортом и круглогодично воздушным транспортом. Рейсы выполняются самолетами типа Як-42Д, Боинг-737-700, RRJ-95, А-320 из городов Красноярск, Уфа, Ижевск, Томск, Сургут, Москва до г. Игарки, далее перелет вертолетами типов As-355, Ми-8 АМТ, Ми-8 МТВ, Ми-171, Ми-26 [1; 2].

В настоящей работе проведено исследование эффективности транспортного процесса доставки ресурсов на Ванкорское месторождение авиационным транспортом ООО «РН-Ванкор» с помощью метода сетевого планирования. Этот метод позволяет с меньшими затратами времени и средств находить количественное выражение взаимосвязи между сложными социально-экономическими, технологическими и иными процессами [3].

Актуальность темы заключается в возможности снижения материальных, трудовых и временных затрат при правильной организации планирования доставки ресурсов на месторождения, что является важной задачей развития нефтяной отрасли страны.

В работе решены следующие задачи: проанализирован процесс доставки ресурсов на месторождение с точки зрения выделения основных и дополнитель-

ных работ; проанализированы связи процесса технической эксплуатации с процессом планирования доставки ресурсов; построены сетевые графики основных и дополнительных процессов планирования доставки ресурсов; проанализированы сетевые графики на предмет поиска резервов; предложены пути повышения эффективности процесса планирования доставки ресурсов.

В исследовании введены обозначения работ, событий и их последовательностей, методом сетевого планирования построены сетевые графики процесса планирования доставки ресурсов, проанализированы основные этапы планирования, виды работ, затрачиваемые ресурсы и время.

На рисунке приведен основной график процесса планирования доставки ресурсов, который содержит следующие события: А0 – определена потребность доставки ресурсов, А1 – собрана информация о потребности, А3 – создан график, А4 – проведен тендер на оказание авиационных услуг (выбор авиакомпании), А5 – подписан договор с авиакомпанией, А6 – сформирован план полетов на месяц по датам и направлениям, создан файл перевахтовки, А7 – получены и обработаны заявки на перелет/перевозку грузов, А8 – сформированы списки по рейсам и направлениям, А9 – составлен и выполнен суточный план полетов, А10 – организован дополнительный рейс в не план-графика либо в случае нештатной ситуации.

Обозначения содержания работ, на которые опирается процесс планирования

Условное обозначение	Содержание работы	Опирается на работы	$t_{ai}$ , час
$a_{03}$	Сбор информации о потребности, обработка и консолидация данных	-----	24
$a_{04}$	Анализ рынка и подготовка документов к тендеру	$a_{03}$	12
$a_{36}$	Формирование плана полетов на месяц, подача в авиакомпанию план-графика и заявки на полёт, создание файла на перевахтовку	$a_{03}$	16
$a_{45}$	Процедура согласования, подписания и активации договора	$a_{04}$	10
$a_{53}$	Внесение изменений в годовой график	$a_{45}$	1
$a_{68}$	Обработка заявок на перелет/перевозку грузов, формирование списков пассажиров по рейсам, направлениям, месторождениям	$a_{36}, a_{53}$	53
$a_{59}$	Обеспечение суточного плана со стороны авиакомпании	$a_{45}, a_{89}$	80
$a_{89}$	Составление и ведение суточного плана полетов	$a_{53}, a_{68}$	13

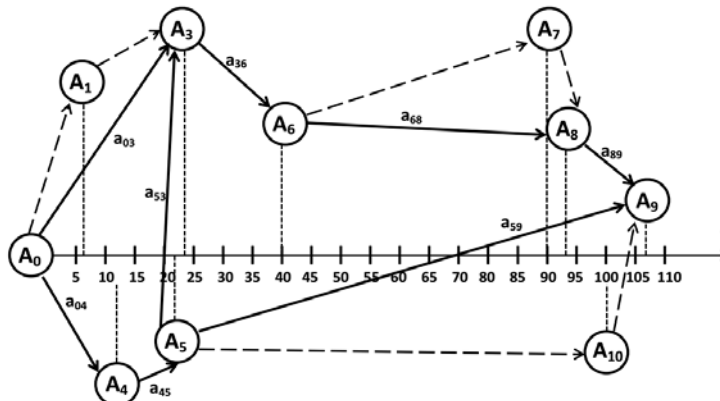


График планирования доставки ресурсов с учетом процесса технической эксплуатации ВС

Фиктивной работой является планирование дополнительного рейса вне плана либо подготовка резервного ВС  $a_{510}$ . Данные события связаны между собой действительными (отображены сплошными стрелками) и фиктивными (отображены пунктирными стрелками) работами, не требующими затрат дополнительных материальных ресурсов, но показывающими взаимосвязи, отраженные в таблице. Процесс от  $A_0$  до  $A_9$  занимает 106 рабочих часов [4].

На основе составленного сетевого графика и анализа показателей эффективности [5] транспортного процесса доставки ресурсов авиационным транспортом на Ванкорское месторождение выявлено, что за 2013–2018 года показатели эффективности снижаются при неизменной численности персонала, задействованного в планировании доставки ресурсов, так как растет интенсивность работы и трудозатраты.

Предложены пути решения данной проблемы:

1) увеличить численность персонала по штатному расписанию либо изменить график работы персонала и перераспределить действующий функционал между работниками;

2) заменить определенные виды работ программным обеспечением, способным автоматизировать процессы и исключить ошибки под влиянием человеческого фактора;

3) включить строительство ангара и линейной станции технического обслуживания воздушных судов в план мероприятий по строительству посадочных площадок для самолетов DHC-6 Twin Otter S400 на Ванкорском месторождении.

Библиографические ссылки

1. Динков В. А. Нефтяная промышленность вчера, сегодня, завтра. М. : ВНИИОЭНГ, 2011.
2. Ванкорские горизонты. Земля. Нефть. Люди / под ред. В. Гусельников. Красноярск : Platina, 2016. 160 с.
3. Кабков П. К. Исследование операций и системный анализ. М. : МГТУ ГА, 2005. 96 с.
4. Божов Л. Б. Авиатранспортные системы. Ульяновск : УВАУ ГА (И), 2013.
5. Ицкович А. А., Смирнов, Н. Н. Управление эффективностью процесса технической эксплуатации самолетов. М. : МИИГА, 1993

References

1. Dinkov V. A. Neftyanaya promyshlennost' vchera, segodnya, zavtra. [Oil industry: yesterday, today, tomorrow]. Moscow, VNIIOENG Publ, 2011.
2. Gusel'nikov V. [Vankor skyline. Land. Oil. People]. Krasnoyarsk : IPK «Platina» Publ, 2016. 160 p.
3. Kabkov P. K. Issledovanie operatsiy i sistemnyy analiz. [Operations Research and Systems Analysis] Moscow, MSTUCA Publ, 2005. 96 p.
4. Bozhov L. B. Aviatransportnye sistemy. [Air Transport Systems] Ulyanovsk : Ulyanovsk Civil Aviation Institute Publ, 2013.
5. Itskovich A. A., Smirnov, N.N. Upravlenie effektivnost'yu protsesssa tekhnicheskoy ekspluatatsii samoletov. [Performance management of aircraft technical operation]. Moscow, MSTUCA Publ, 1993.



УДК 629.7/621.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМОЛЁТА ЯК-42 ПО ДАННЫМ АВИАПРЕДПРИЯТИЯ АО «КРАСАВИА»

С. В. Леонов, С. А. Ткаченко, Р. С. Колесников, О. Г. Бойко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: leonov.sergey9796@gmail.com

*Рассмотрены статистические данные по движению самолёта Як-42 по состояниям эксплуатации. Выполнена оценка эффективности процесса с использованием аппарата теории Марковских процессов.*

*Ключевые слова: процесс технической эксплуатации, граф состояний и переходов, дифференциальные уравнения Колмогорова.*

## RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF USING THE YAK-42 PLANE ACCORDING TO THE DATA OF THE KRASAVIA AIRLINES

S. V. Leonov, S. A. Tkachenko, R. S. Kolesnikov, O. G. Boiko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: leonov.sergey9796@gmail.com

*The article considers statistical data on the movement of the Yak-42 aircraft according to operating conditions. An assessment of the effectiveness of the process using the apparatus of the theory of Markov processes.*

*Keywords: technical operation process, state graph and transitions, Kolmogorov differential equations.*

Повышение эффективности использования ЛА является актуальной задачей для обеспечения регулярности полетов и выживания в условиях жесткой конкурентной борьбы. Целью работы является проведение исследования эффективности использования самолётов Як-42 по данным авиапредприятия «КрасАвиа» за период с 2016 по 2018 г.

Для достижения поставленной цели были собраны и обработаны статистические данные о времени эксплуатации самолётов Як-42; составлены графы состояний и переходов процесса технической эксплуатации (ПТЭ); составлены дифференциальные уравнения Колмогорова для описания ПТЭ; рассчитаны вероятности нахождения в состояниях и показатели эффективности ПТЭ, а также произведен их анализ и разработаны предложения к авиапредприятию.

ПТЭ за исследуемый период включал следующие состояния: К – полёт, Е – подготовка к полёту, А – неиспользованное время, Г – в резерве, ТО – нахож-

дение на техническом обслуживании, В – восстановление после происшествий, Дв – простои из-за отсутствия двигателей, М – задержки по метеоусловиям и запретам полетов [1]. Для моделирования использовался аппарат теории Марковских процессов. На основании выделенных из статистики состояний ПТЭ, составлены и размечены графы состояний и переходов ПТЭ. Обобщенный граф (рис. 1) включает 7 вершин, в частных случаях для групп кварталов в графах отсутствуют некоторые состояния и вершин в них меньше.

На основании данных о продолжительности пребывания в состояниях и значениях количества попадания в состояния ПТЭ, рассчитано среднее время нахождения в каждом из них и произведены расчеты интенсивностей переходов между состояниями [2].

После этого для графов составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова. Для обобщенного графа система уравнений имеет вид [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_K(t)}{dt} = a_{E-K} * P_E(t) - P_K(t) * (a_{K-E} + a_{K-TO}); \\ \frac{dP_{TO}(t)}{dt} = a_{Дв-ТО} * P_{Дв}(t) + a_{K-ТО} * P_K(t) - P_{TO}(t) * (a_{ТО-Дв} + a_{ТО-ГА} + a_{ТО-В}); \\ \frac{dP_{Дв}(t)}{dt} = a_{ТО-Дв} * P_{ТО}(t) - a_{Дв-ТО} * P_{Дв}(t); \\ \frac{dP_B(t)}{dt} = a_{ТО-В} * P_{ТО}(t) - a_{В-ГА} * P_B(t); \\ \frac{dP_{ГА}(t)}{dt} = a_{В-ГА} * P_B(t) + a_{ТО-ГА} * P_{ТО}(t) - a_{ГА-Е} * P_{ГА}(t); \\ \frac{dP_E(t)}{dt} = a_{ГА-Е} * P_{ГА}(t) + a_{K-E} * P_K(t) + a_{М-Е} * P_M(t) - P_E(t) * (a_{Е-М} + a_{Е-K}); \\ \frac{dP_M(t)}{dt} = a_{Е-М} * P_E(t) - a_{М-Е} * P_M(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

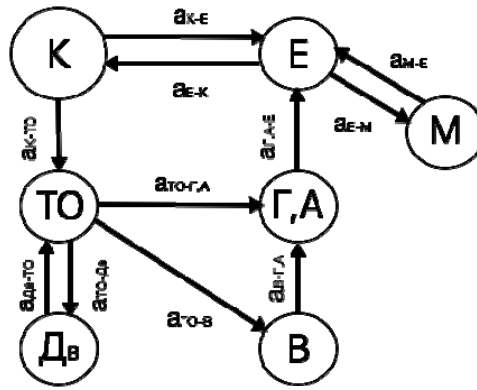


Рис. 1. Размеченный граф состояний и переходов ПТЭ самолета Як-42 для авиакомпании «КрасАвиа»

Вероятности нахождения воздушного судна в каждом из состояний

	$P_K(t)$	$P_{ТО}(t)$	$P_{Дв}(t)$	$P_B(t)$	$P_A(t)$ $(P_{Г,А}(t))$	$P_E(t)$	$P_M(t)$	$K_{И}$	$K_{П}$
2016 год	0,396	0,0956		0,00011	0,0956	0,4043	0,0083	0,11	4,09
2017 год	0,394	0,0952	0,00023		0,095	0,4048	0,0112	0,24	2,83
2018 год	0,395	0,0952			0,0952	0,4048	0,0102	0,27	1,7

$$K_{И} = \frac{P_K * \mu_K * H_C}{\sum_{i=1}^N P_i * \mu_i * 24}$$

$$K_{П} = \frac{\sum_{j=1}^N P_j * \mu_j * 24}{P_K * \mu_K * H_C}$$

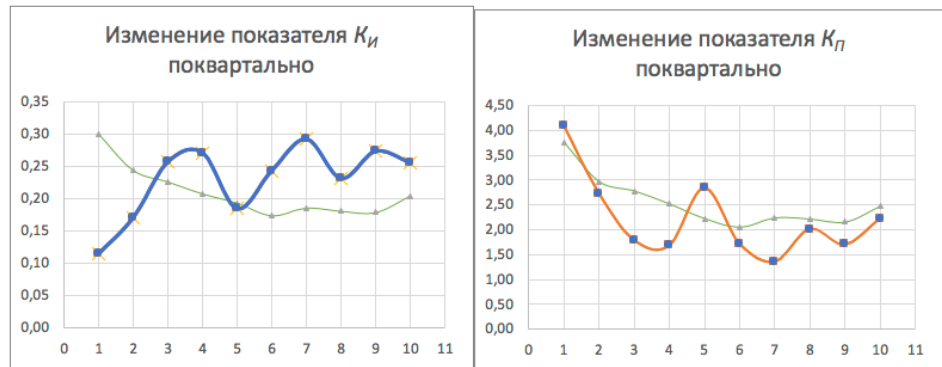


Рис. 2. Показатели эффективности ПТЭ

Поскольку ПТЭ со временем становится стационарным, то из систем дифференциальных уравнений был осуществлен переход к системам алгебраических уравнений [4], после чего были рассчитаны вероятности нахождения ВС в каждом из состояний и определены показатели эффективности ПТЭ [5], которые представлены в таблице.

Также построены графики изменения показателей эффективности ПТЭ:  $K_{И}$  – коэффициент использования ЛА по назначению,  $K_{П}$  – коэффициент удельных суммарных простоев поквартально по отношению к курсу доллара за исследуемый период (рис. 2).

Анализ построенных графиков свидетельствует, о том, что коэффициент использования имеет невысокие значения по сравнению с таким же показателем у компании «Utair» и «Норильск Авиа», а коэффициент удельных простоев на ТО и Р имеет значения больше

единицы, что свидетельствует о несовершенстве организации ПТЭ авиакомпании или о высокой конкуренции на рынке авиаперевозок.

По результатам расчетов и анализа в работе предложено увеличивать маршрутную сеть ВС Як-42; внедрить на предприятии бережливое производство для уменьшения времени простоев на ТО; создать оптимальный неснижаемый запас запчастей на складах для ТО.

Библиографические ссылки

1. Сведения о компании «КрасАвиа» [Электронный ресурс]. URL: <https://akkrasavia.ru/about/> (дата обращения: 03.09.2019).
2. НТЭРАТ-93 России [Электронный ресурс]. URL: <http://zakonrus.ru/avia/nterat-93.html> (дата обращения: 01.09.2019).

3. Ицкович А. А., Чинючин Ю. М., Смирнов Н. Н. Управление качеством процессов технической эксплуатации авиационной техники : учеб. пособие. М. : МГТУ ГА. 2011. 90 с.

4. Техническая эксплуатация летательных аппаратов : учебник / Н. Н. Смирнов, Н. И/ Владимиров и др. М. : Транспорт. 1990. 423 с.

5. Бойко О. Г. Управление системами и процессами технической эксплуатации летательных аппаратов : практикум / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. 29 с.

#### References

1. *Svedeniya o kompanii «KrasAvia»* [Information about KrasAvia airlines] [Electronic resource] (In Russ). URL: <https://ak-krasavia.ru/about/> (access: 03.09.2019).

2. *NTERAT-93 Rosii* [Manual of the maintenance and repair of aircraft in the civil aviation of Russia] [Electronic resource] (In Russ). URL: <http://zakonrus.ru/avia/nterat-93.html> (access: 01.09.2019).

3. Itskovich A. A., Chinyuchin Yu. M., Smirnov N. N. *Upravlenie kachestvom protsessov tekhnicheskoy ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki* [Quality management of the processes of technical operation of aircraft]. Moscow : MGTU GA, 2011. 90 p.

4. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov* [Technical operation of aircraft] / N. N. Smirnov, N. I Vladimirov et al. Moscow : Transport, 1990. 423 p.

5. Boyko O. G. *Upravlenie sistemami i protsessami tekhnicheskoy ekspluatatsii letatel'nykh apparatov: Praktikum dlya napravleniy podgotovki 25.04.01 i 25.04.02 vseh form obucheniya*. [Management of systems and processes for the technical operation of aircraft: Workshop for training areas 25.04.01 and 25.04.02 of all forms of training] / Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2017. 29 p.

© Леонов С. В., Ткаченко С. А.,  
Колесников Р. С., Бойко О. Г., 2019

## КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Ю. В. Огородникова, В. В. Лукасов, С. О. Майнашева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: grand\_espada24@mail.ru

*На примере самолета Ан-26 рассмотрен вопрос о причинах возникновения коррозионных повреждений на поверхностных элементах конструкции планера, приведены некоторые методы по их устранению.*

*Ключевые слова: коррозия, авиация, техническое обслуживание, воздушное судно.*

## CORROSION DAMAGE TO CIVIL AVIATION AIRFRAME STRUCTURE

Y. V. Ogorodnikova, V. V. Lukasov, S. O. Majnasheva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: grand\_espada24@mail.ru

*In the article, on the example of the civil An-26 aircraft, the question of the causes of corrosion damage on the surface elements of the airframe design is considered and some methods for their elimination are given.*

*Keywords: corrosion, aviation, maintenance, aircraft.*

Коррозия является одним из негативных факторов, который, в процессе эксплуатации, значительно снижает надёжность авиационной техники, что в свою очередь, отрицательно влияет на безопасность полётов.

Характер коррозионных повреждений самолетов гражданской авиации различен и зависит от многих факторов, таких как: условия базирования воздушных судов (ВС); условий, при которых работают элементы, изделия и агрегаты внутри конструкции; длительности эксплуатации; программы по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р).

Согласно ГОСТу 5272–68 коррозия – это разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой [1].

Создание защитных поверхностей является наиболее распространенным методом предохранения металлов и сплавов от коррозии. Защитные покрытия по виду материала делятся на следующие группы:

- металлические (гальванические);
- неорганические, неметаллические (окисные, фосфатные и т. п.);
- органические (лакокрасочные).

Из вышеперечисленных видов противокоррозионных покрытий наибольшую распространенность получило применение лакокрасочных покрытий в сочетании с неорганическим покрытием.

Наиболее доступным способом защиты металлических и неметаллических покрытий от коррозии и последующего разрушения является применение лакокрасочных покрытий. От остальных видов защиты он отличается экономически выгодной стоимостью и достаточно простой технологией изготовления. Кроме того, именно ЛКП как способ защиты поверхности самолета от коррозии, придает летательным аппара-

там (ЛА) красивый внешний вид, отражает солнечные лучи, что позволяет уменьшить нагрев пассажирских кабин при стоянке ЛА [2], а также снижает сопротивление.

Наиболее часто встречающимися зонами поражениями коррозий является верхняя обшивка самолета. На рис. 1 представлена коррозия обшивки фюзеляжа у шпангоута № 33 самолета гражданской авиации Ан-26, в наиболее нагруженном участке. Площадь поражённой поверхности коррозией составила 30 мм<sup>2</sup>.

Для устранения данного повреждения был использован метод зачистки, наложения заплатки с последующим нанесением лакокрасочного покрытия (ЛКП).

Особенно влиянию коррозии подвержены нижние поверхности самолета. Это объясняется условиями эксплуатации: сконденсировавшаяся после посадки влага, а также осевшая роса, влага после дождя способствует появлению коррозии. С верхних поверхностей влага испаряется быстро. Этому способствует температура и ветер. Нижние же поверхности из-за незначительного расстояния от земли, увлажнены практически постоянно за счет испарения влаги из почвы и конденсации на обшивке.

Внутренние поверхности конструкции планера самолета и находящиеся внутри конструкций детали в коррозионном отношении работают в ещё более трудных условиях, чем внешние, что объясняется скоплением и длительной задержкой влаги внутри самолета.

Внутренние поверхности обшивки и детали внутреннего набора под полом пассажирских кабин особенно подвержены неблагоприятному воздействию влаги.

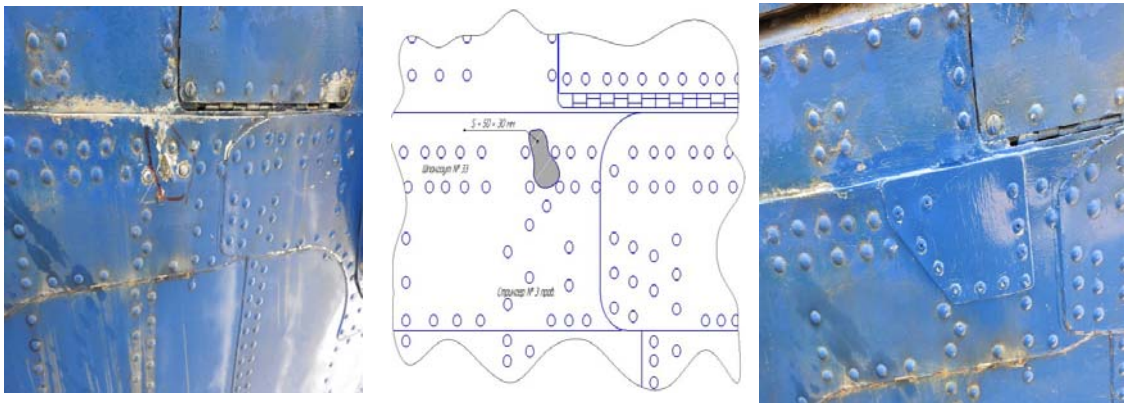


Рис. 1. Коррозионное повреждение обшивки у шпангоута № 33 самолета Ан-26



Рис. 2. Очаги коррозии глубиной 0,15 мм обшивки фюзеляжа изнутри подпольного пространства между шпангоутами № 22-23, площадью 75×50 мм

Сконденсировавшаяся влага длительно задерживается, загрязняется и становится более коррозионно-активной.

Загрязнение воды под полом пассажирской кабины происходит чаще всего из-за недостаточной герметичности полов туалетов и неисправности коммуникации санузлов [3]. Эти жидкости весьма агрессивны, особенно в отношении алюминиевых сплавов. Влага длительно задерживается также на нижних внутренних поверхностях в случае неудачного расположения или засорения дренажных отверстий для отвода воды, а также при отсутствии периодического проветривания и продувки подпольного пространства теплым воздухом. На рис. 2 можно увидеть очаги коррозии глубиной 0,15 мм обшивки фюзеляжа изнутри подпольного пространства между шпангоутами № 22-23, 0, площадью 75×50 мм на самолете Ан-26!

Алгоритм устранения очагов коррозии в подпольном покрытии гражданских ВС следующий: производится зачистка поврежденного участка, обезжиривание, наложение слоя грунтовки с последующим покрытием ЛКП. Зазоры и щели, образующиеся в местах соединения элементов жесткости (стрингеров, шпангоутов и др.) с внутренней поверхностью обшивки, где влага задерживается надолго, способствуют развитию коррозии в подпольной части пассажирских и грузовых самолетов. При контакте разнородных сплавов, например, алюминиевых и магниевых, коррозия в зазорах и щелях развивается наиболее интенсивно.

В ходе сбора информации были выявлено и подтверждено исследовательским путем, что наиболее часто встречающимися очагами возникновения коррозии являются: 75% коррозии под подпольным покрытием в салоне и 85 % коррозии в нижней части фюзеляжа.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 5272–68. Коррозия металлов. Термины (с Изменениями N 1, 2).
2. Белов В. К. Повышение усталостной долговечности заклепочных и сварных соединений авиационных конструкций технологическими методами : монография. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. 179 с.
3. Никитин Г. А., Баканов Е. А. Основы авиации. М. : Транспорт, 1984. 261 с.

#### References

1. GOST 5272–68. Corrosion of metals. Terms (with Changes N 1, 2).
2. Belov V. K. Improving fatigue life of riveted and welded joints of aircraft structures engineering methods: monograph. Novosibirsk : NSTU publishing House, 2006. 179 p.
3. Nikitin G. A., Bakanov E. A. Fundamentals of aviation. M. : Transport, 1984. 261 p.

© Огородникова Ю. В., Лукасов В. В.,  
Майнашева С. О., 2019

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БПЛА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Д. Е. Петлинский, Е. П. Олейников\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: daniil.petlinsky@yandex.ru

*Оценивается польза использования беспилотных летательных аппаратов в современном мире.*

*Ключевые слова: дрон, беспилотный летательный аппарат.*

## THE USE OF UAV IN THE MODERN WORLD

D. E. Petlinsky, E. P. Oleynikov\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: daniil.petlinsky@yandex.ru

*The use of unmanned aerial vehicles is evaluated in the modern world.*

*Keywords: drone, unmanned aerial vehicle.*

Введение. В последнее время появился тренд, связанный с внедрением в повседневную жизнь человека автономных технологий. На данный момент этой технологией является использование дронов. Дрон является беспилотным летательным аппаратом. Изначально он использовался в военных целях для разведки территорий.

Главной целью дронов является, выполнение различных операций потенциально опасных для жизни человека. На данный момент дроны могут оснащаться камерами, датчиками, захватами для грузов и оружия. Для выполнения различных работ, требующих тщательного контроля, за управление дроном чаще всего отвечает человек, а не система. Дроны в повседневной жизни могут работать в четырех отраслях: охрана территорий, спасение людей и животных, доставка грузов, исследование местности [1].

Использование БПЛА. Одним из главных достоинством дронов является мобильность. Поэтому дронов, на которых установлены датчики и камеры, можно использовать для патрулирования территории, как частных секторов, так и государственных организаций, тем самым предупреждая о несанкционированном проникновении [2].

Дроны полезны там, куда людям сложно или опасно попасть. Например, в заражённые радиацией, химическими веществами области или территории, пострадавшие от природных катастроф. Там они могут выполнять работы по поиску и сбору необходимых аналитических данных, которые могли бы оказать значительную помощь спасательным службам в локализации возникшего ЧП. Ведь много случаев, опасных для жизни, происходит, когда люди отдыхают на природе. Поэтому дроны как средство моментального реагирования очень важны, потому что маловероятно, что человек сможет долго пробыть в химически от-

равленной среде и при этом еще искать людей. БПЛА используются также для таких работ, как составление различных карт, геодезических планов местности, измерение температуры или уровня загрязнения, мониторинг погодных явлений, а также наблюдение за зонами повышенного риска [3].

Подобные технологии могли помочь упростить топологические исследования для прокладки оптимального маршрута при проектировании новых зданий, различных типов помещений, в особенности, в труднодоступных природных условиях. Дроны часто используются для аэрофотосъемки. Там, где раньше человеку приходилось использовать воздушную технику, наподобие вертолета, то теперь его можно заменить дронами. Теперь, вместо использования тяжелой техники, человеческих ресурсов и дорогого геодезистского инвентаря, дроны могут выполнить работу, затратив значительно меньше времени и ресурсов [4].

Не только в России, но и по всему миру существуют огромные компании, у которых есть собственные, как аэропорты, так и обычные судовые порты. Поэтому технологии беспилотных устройств могли бы позволить им расширить свои возможности для доставки грузов и документов. Такие технологии можно реализовать на терминально-логистическом комплексе, чтобы облегчить сортировку или перемещение сравнительно небольших по размеру и весу грузов в различных случаях. При работе на промышленных предприятиях, беспилотники могут автоматизировать часть операций, которые проводятся людьми, например, перемещение деталей или документации при большой площади эксплуатируемого помещения. Когда человеку нужно будет преодолеть малое расстояние за короткое время, запуск дрона будет незаменим [5].

### Библиографические ссылки

1. Биард Рэндалл У., МакЛэйн Тимоти У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика : учеб. пособие. М. : Техносфера, 2015. 312 с.
2. Накадзава С., Довыденко Ю. В. Новые способы использования беспилотников // Бизнес-курьер: рекламно-информ. журнал. 2015. № 22. С. 68–70.
3. Съемка с воздуха: беспилотные летательные аппараты [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--80aaficospvye2a0a3d.xn--p1ai/o-nas/slovar-terminov/17-blog-blog/159-besplotniki-na-sluzhbe-u-biznesa.html> (дата обращения: 03.09.2019).
4. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 2016. 240 с.
5. Остославский И. В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. М. : ЁЁ Медиа, 2016. 413 с.

### References

1. Beard Randall W., McLean Timothy W. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice : studies. benefit. Moscow, Technosphere, 2015. 312 p.
2. Nakazawa S., Davydenko Yu. V. New ways of using drones // Business courier: reklamno.-inform. Sib. 2015. № 22. P. 68–70.
3. Aerial photography: unmanned aerial vehicles [Electronic resource]. URL: <http://xn--80aaficospvye2a0a3d.xn--p1ai/o-nas/slovar-terminov/17-blog-blog/159-besplotniki-na-sluzhbe-u-biznesa.html> (access: 3.09.2019).
4. Automatic control and diagnostics of aircraft power plant control systems. Moscow, Mashinostroenie, 2016. 240 p.
5. Ostoslavsky I. V. Dynamics of flight. Trajectories of aircraft. Moscow, HER Media, 2016. 413 p.

© Петлинский Д. Е., Олейников Е. П., 2019

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Н. С. Писарев, Н. И. Стаценко, Р. А. Акзигитов

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

*Предложена разработка инновационной комплексной системы, направленной на повышение безопасности полетов. Эта система будет представлять собой совокупность устройств и программного обеспечения. Актуальность такой системы заключается в наличии негативного воздействия человеческого фактора на процедуру полета воздушного судна. Основанием для необходимости создания подобной системы будут являться статистические данные об авиационных инцидентах.*

*Ключевые слова: безопасность полетов, техническое обслуживание, предполетная подготовка, запрет на вылет.*

## DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED SECURITY IMPROVEMENT SYSTEM

N. S. Pisarev, N. I. Statsenko, R. A. Akzigitov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: akzigitov-r@mail.ru

*This work will propose the development of an innovative integrated system aimed at improving safety. This system will be a collection of devices and software. The relevance of such a system is the presence of the negative impact of the human factor on the flight procedure of the aircraft. The reason for the need to establish such a system would be statistics on aviation incidents.*

*Keywords: flight safety, maintenance, preflight training, ban on departure.*

**Введение.** В процессе предполетной подготовки нехватка времени на сборы – залог рассеянности, некорректного выполнения обязанностей. Суэта возникает, например, в связи с необходимостью принять топливо, внести поправки в базу от синоптической службы, связаться с экспертами-специалистами по контролю технического обслуживания самолета, обсудить MEL-ограничения с командиром воздушного судна и т. д. Эти все мероприятия выполняются одновременно, поэтому неудивительно, что можно упустить какой-либо важный момент [1].

Еще одним примером ошибкой пилотов является их предрасположенность к спешке. Согласно докладом ученых-исследователей Мак-Эльхеттона, а также Дрю, 64 % от общего числа опрошенных пилотов, включая даже самых опытных, имеют такую эмоциональную склонность [2–4].

Все это говорит о необходимости разработки системы, направленной на минимизацию негативного влияния человеческого фактора, а также некоторых психологических предрасположенностей большинства пилотов к спешке.

Комплексная система повышения безопасности будет в себя:

1. Программное обеспечение, используемое для проведения технического обслуживания (рис. 1).

2. Устройства, используемые для получения и обработки информации в процессе проведения технического обслуживания (рис. 2).

3. Устройство на базе микроконтроллеров, используемое во время предполетной подготовки – на данное устройство будет загружаться данные, полученные во время проведения технического обслуживания. Если полученные данные имеют ненормальные значения, то устройство заблокирует системы самолета, тем самым не позволив совершать полет при наличии неисправностей, которые могут угрожать безопасности полета (рис. 3).

Как показано на схемах, если данные, загруженные в микроконтроллерное устройство, имеют нормальные значения для данного типа ВС, то система позволяет произвести полет [5]. Если же эти данные имеют ненормальные значения для данного типа ВС, то система не позволит произвести полет до тех пор, пока данные неисправности не будут устранены. Это позволит минимизировать негативное влияние человеческого фактора, а также исключит возможность проведения полета с имеющимися неисправностями.





Рис. 1. Процентное соотношение причин авиационных происшествий



Рис. 2. Схема проведения ТО с использованием устройства для получения данных о состоянии систем

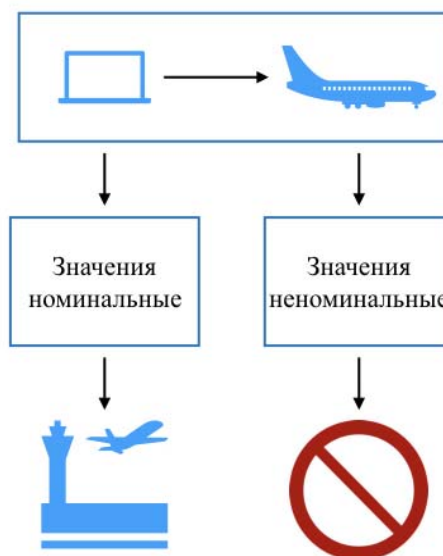


Рис. 3. Схема сопряжения микроконтроллерного устройства с ВС

**Библиографические ссылки**

1. Бродин В., Шагурин М. Микроконтроллеры. Архитектура, программирование, интерфейс. М. : ЭКОМ, 1999. 400 с.
2. Карпенков С. Х. Современные средства информационных технологий : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М. : КноРус, 2013. 400 с.
3. Человеческий фактор в авиации / С. Д. Лейченко, А. В. Малишевский, Н. Ф. Михайлик. СПб. : Санкт-Петербург. гос. ун-т гражданской авиации, 2005. 473 с.
4. Баранов В. Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. М. : Додэка-XXI, 2006. 288 с.
5. Микроконтроллеры PIC и встроенные системы. Применение ассемблера и C для PIC18 / М. А. Мазиди, Р. Д. МакКинли, Д. Кусэй ; пер. с англ. В. В. Литвина. СПб. : КОРОНА-принт : МК-Пресс, 2009. 784 с.

**References**

1. Brodin V., Shagurin M. Mikrokontrollery. Arkhitektura, programmirovaniye, interfeis. Moskva : EKOM, 1999. 400 s.
2. Karpenkov S. Kh. Sovremennyye sredstva informatsionnykh tekhnologii: uchebnoye posobie. 2-e izd., ispr. i dop. Moskva : KnoRus, 2013. 400 p.
3. Chelovecheskii faktor v aviatsii / S. D. Leichenko, A. V. Malishevskii, N. F. Mikhailik. SPb.: Sankt-Peterburg. gos. un-t grazhdanskoi aviatsii, 2005. 473 p.
4. Baranov V. N. Primeneniye mikrokontrollerov AVR: skhemy, algoritmy, programmy. Primeneniye mikrokontrollerov AVR: skhemy, algoritmy, programmy. Moskva : Dodeka-XXI, 2006. 288 p.
5. Mikrokontrollery PIC i vstroennyye sistemy. Primeneniye assemblera i S dlya PIC18 / M. A. Mazidi, R. D. MakKinli, D. Kusei ; Per. s angl. V. V. Litvina. SPb. : KORONA-print : MK-Press, 2009. 784 p.

© Писарев Н. С., Стаценко Н. И.,  
Акзигитов Р. А., 2019

## ALLEGED DISASTERS OF 2025

A. V. Sayapin, D. S. Gerasimova\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: Wolhidka@mail.ru

*Ensuring the safety of flights in civil aviation is an urgent task today. The authors analyze the number and condition of the aviation disasters all over the world in the last 9 years. The proposed method allows to approximate the number of the disasters in the world and in Russia in 15 years using least square adjustment method.*

*Keywords: civil aviation, forecast, catastrophe, least square adjustment method.*

## ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ АВИАКАТАСТРОФЫ 2025 ГОДА

А. В. Саяпин, Д. С. Герасимова\*

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

*Обеспечение безопасности полетов в гражданской авиации является актуальной задачей по сей день. Авторы анализируют количество и состояние авиакатастроф в мире за последние 9 лет. Выдвигаются теории и методы предотвращения их в будущем. Рассчитывается количество авиакатастроф в мире и в России через 15 лет, используется метод наименьших квадратов, анализируются полученные данные для России и мира.*

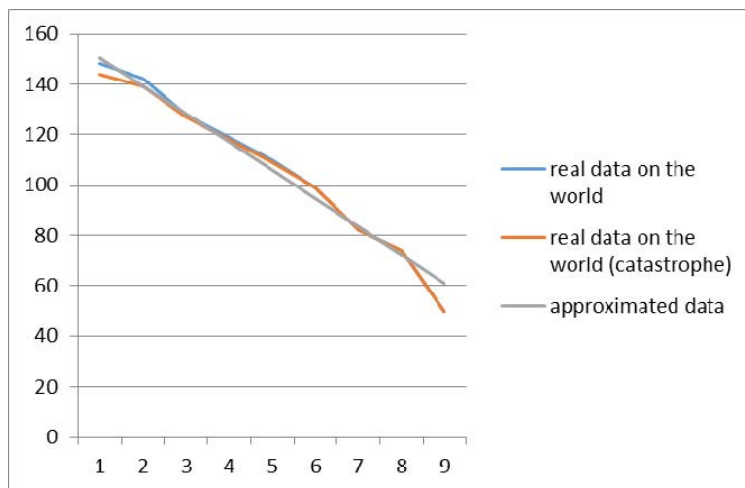
*Ключевые слова: гражданская авиация, прогноз, катастрофа, метод наименьших квадратов.*

**Introduction.** The safety of flights in civil aviation is an urgent task today. Despite the enormous efforts of the states to solve the problem, air crashes happen worldwide every year. Let us take the crash data for the past 9 years (see Table) The number of disasters has almost halved over the last 5 years all over the world. Meanwhile, the number of disasters in Russia has not decreased significantly. The table also shows that about a third of the incidents happening in Russia. The human factor is the cause of 90 percent of disasters [1; 2].

**Proposed method.** We consider the total number of disasters happened during the calculation period (2011 to

2019). The method authors propose sums the number of the incidents happened by the end of each year we have the data. It gives us a non-decreasing function over time. The using of the given approach allows us to get a relatively smooth function which allows avoiding the outliers. The function  $ax^b + cx + d$  has been chosen as the approximation function, where  $b$  coefficient considered to be between 0 and 1, then least squares adjustment method has been applied [3–5] The result is shown in diagram.

The proposed method suggests that the number of catastrophes would be about 330 by the end of the year 2035.



Disaster distribution function

**Catastrophe data in the world and in Russia**

Year	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011
World incidents	6	14	9	9	11	17	8	24	50
World catastrophe	5	12	9	9	10	17	8	24	50
Russia incidents	4	3	4	3	2	4	3	9	23
Russia catastrophe	3	3	4	3	2	4	3	9	23

It means that about 180 catastrophes would happen during the upcoming 15 years providing the current tendencies would be the same during that time.

**Conclusion.** Under the given circumstances (flight safety, pilot training, the state of the fleet), about 180 accidents will occur all over the world within 15 years. 122 of these would happen in Russia, which gives us about 37 %.

**References**

1. ASN Aviation Safety Database [Electronic resource]. URL: <http://www.aviation-safety.net/database/> (access: 30.08.2019).

2. Wilkingson J. Flight safety. Flight International, 1976. Vol. 109, № 3489. P. 186.

3. Devore L. Probability and statistics for engineering and the science. Duxbury press, 2003. P. 458.

4. Charnes A. The Equivalence of Generalized Least Squares and Maximum Likelihood Estimates in the Exponential Family, Frome, 1976. P. 169–171.

5. Zare H. Scoring relevancy of features based on combinatorial analysis of Lasso with application to lymphoma diagnosis. BMC Genomics, 2013. P. 14.

© Sayapin A. V., Gerasimova D. S., 2019

УДК 629.7.063.6

## К ВОПРОСУ О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЕТА АН-24

С. А. Ткаченко, С. В. Леонов, Е. Е. Сяков, О. Г. Бойко

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

*Рассмотрены статистические данные по отказам и неисправностям топливной системы самолета Ан-24, на основании которых выполнен анализ и предложены пути совершенствования технологического процесса технического обслуживания.*

*Ключевые слова: топливная система, процесс технического обслуживания, отказ, неисправность.*

## TO THE QUESTION OF ENHANCEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MAINTENANCE OF THE FUEL SYSTEM OF THE AN-24 AIRPLANE

S. A. Tkachenko, S. V. Leonov, E. E. Syakov, O. G. Boiko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: s-tkach@mail.ru

*The work considers statistical data on failures and faults of An-24 aircraft fuel system, on the basis of which analysis was performed and ways to improve the maintenance process are proposed.*

*Keywords: fuel system, maintenance process, failure, fault.*

Совершенствование технологического процесса технического обслуживания является актуальной задачей для повышения уровня безопасности полетов, уменьшения времени нахождения самолетов в состояниях технического обслуживания (ТО) или ремонте (Р), а следовательно, повышение эффективности использования воздушного судна (ВС) по его назначению [1].

Целью работы является исследование технологического процесса ТО топливной системы самолета Ан-24 на предмет поиска путей его совершенствования. Для достижения цели в работе решены следующие задачи: собраны и обработаны статистические данные об отказах и неисправностях топливной системы ВС Ан-24, выявлены наиболее часто отказывающие изделия, выполнен инженерный анализ системы и её составных частей с целью применения рациональных методов совершенствования технологического процесса, сформированы по результатам анализа и расчётов рекомендации по усовершенствованию технологического процесса, разработаны предложения по применению современных агрегатов топливной системы [2].

Топливная система самолета Ан-24 предназначена для размещения запаса топлива на самолете и подаче его к двигателям, турбогенераторной установке или ВСУ на всех возможных режимах эксплуатации самолета [3]. Из числа всех элементов топливной системы, на основании статистических данных по авиакомпании «КрасАвиа» за период 2015–2018 гг. можно

выделить такие элементы, отказы которых имеют наибольшую частоту. К таким элементам относятся: датчики топлива, подкачивающие насосы, блоки измерителей.

В работе рассмотрены условия эксплуатации исследуемой системы, проанализированы основные группы эксплуатационных факторов, которые оказывают существенное влияние на изменение ее технического состояния, исследованы основные виды нагрузок, влияющие на работоспособность элементов системы, исходя из которых составлена технологическая карта анализа технического состояния системы [4]. В ходе проведенного анализа было выявлено, что основной причиной отказов выделенных выше элементов системы является наличие воды в топливе и агрегатах топливной системы, качество и периодичность работ по ТО. Составлена схема причинно-следственных связей изменения технического состояния рассматриваемой системы, приведенная на рисунке.

В работе был проведен расчет и анализ обобщенных показателей эксплуатационной технологичности топливной системы, представленный в таблице, который показал, что в настоящее время суммарная удельная трудоемкость ТОиР и суммарная удельная продолжительность ТОиР остается на прежнем уровне по сравнению с 1983–1987 гг. эксплуатации ВС Ан-24, что говорит о не изменении показателей, несмотря на современные технологии проведения работ по ТОиР, методы и приборы контроля технического состояния [5].

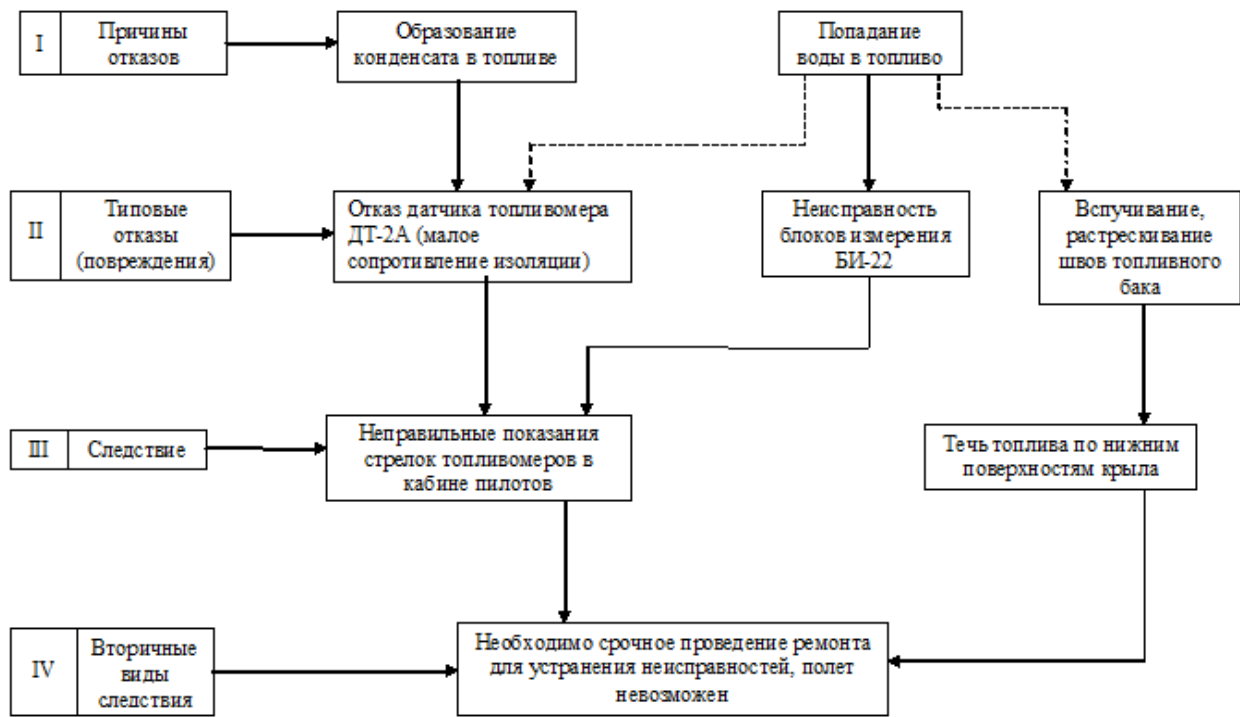


Схема причинно-следственных связей изменения технического состояния топливной системы самолета Ан-24

**Результаты расчета удельной суммарной оперативной продолжительности и трудоемкости ТОиР топливной системы самолета Ан-24**

Формы ТО и Р	n, число обслуживаний за $T_{PEC.C}$	Оперативная продолжительность ТОиР, ч.		Оперативная трудоемкость ТОиР, ч.	
		одного ТОиР	суммарная за $T_{PEC.C}$	одного ТОиР	суммарная за $T_{PEC.C}$
А (предполетное и транзитное ТО)	$n_A = 5500$	$t_A = 1$	5500	$T_A = 3,8$	20900
Б (базовое ТО)	$n_B = 56$	$t_B = 5,6$	313,6	$T_B = 9$	504
Ф-1 (500 ч. нал.)	$n_{Ф1} = 11$	$t_{Ф1} = 18$	198	$T_{Ф1} = 160$	1760
Ф-2 (1000 ч. нал.)	$n_{Ф2} = 3$	$t_{Ф2} = 35$	105	$T_{Ф2} = 238$	714
Ф-3 (1500 ч. нал.)	$n_{Ф3} = 3$	$t_{Ф3} = 55$	165	$T_{Ф3} = 352$	1056
Ремонт (ч/з 5000 ч.)	$n_P = 1$	$t_{CM} = 720$	720	$T_{CM} = 16900$	16900
Итого: 7001,6				Итого: 41834	
$K_{OP} = 1,40124$				$K_{OT} = 9,727$	

В работе рассчитаны оптимальная периодичность работ по техническому обслуживанию подкачивающего насоса ЭЦН-14БМ, и топливного датчика ДТ-2А.

На основании выполненного анализа, разработаны следующие предложения по совершенствованию технологического процесса ТО топливной системы:

1. Оптимальную периодичность ТО для подкачивающего насоса ЭЦН-14БМ предлагается изменить с 1500 часов, что указано в Регламент ТО, на 1400 часов.

2. Оптимальная периодичность дискретного контроля для топливного датчика ДТ-2А предлагается 200 часов в виду их частых отказов из-за попадания частиц воды.

3. Авиапредприятиям предлагается проводить более тщательный контроль заправляемого топлива в ВС на наличие частиц воды.

Предлагается заменить датчик топливомера топливной системы ДТ-2А на электроемкостный датчик ДТС-26 современной комплексной системы топливоизмерения, преимуществами которого является современное исполнение датчика, повышенная степень защиты от воздействия эксплуатационных факторов.

**Библиографические ссылки**

1. Техническая эксплуатация летательных аппаратов : учебник / Н. Н. Смирнов, Н. И. Владимиров и др. М. : Транспорт, 1990. 423 с.
2. Самолет Ан-24. Руководство по техническому обслуживанию. Часть 2.
3. Управление качеством процессов технической эксплуатации авиационной техники : учеб. пособие /

А. А. Ицкович, Ю. М. Чинючин, Н. Н. Смирнов, И. А. Файнбург. М. : МГТУ ГА, 2011. 90 с

4. Бойко О. Г. Управление системами и процессами технической эксплуатации летательных аппаратов : практикум / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. 29 с.

5. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России [Электронный ресурс]. URL: <http://zakonrus.ru/avia/nterat-93.html> (дата обращения: 01.09.2019).

#### References

1. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov*. [Technical operation of aircraft] / N. N. Smirnov, N. I Vladimirov et al. Moscow : Transport, 1990. 423 p.
2. An-24 aircraft; Maintenance Manual. Part 2.

3. *Upravlenie kachestvom protsessov tekhnicheskoy ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki*. [Quality management of the processes of technical operation of aircraft] / A. A. Itskovich, Yu. M. Chinyuchin, N. N. Smirnov, I. A. Faynburg. Moscow : MGTU GA, 2011. 90 p.

4. Boyko O. G. *Upravlenie sistemami i protsessami tekhnicheskoy ekspluatatsii letatel'nykh apparatov : praktikum* / Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2017. 29 p.

5. Nastavlenie po tekhnicheskoy ekspluatatsii i remontu aviatsionnoy tekhniki v grazhdanskoy aviatsii Rossii [Manual on the technical operation and repair of aircraft in the civil aviation of Russia] [Electronic resource] (In Russ). URL: <http://zakonrus.ru/avia/nterat-93.html> (access: 01.09.2019).

© Ткаченко С. А., Леонов С. В., Сяков Е. Е., Бойко О. Г., 2019

## ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. А. Филиппов\*, Е. П. Олейников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

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

*Рассматриваются история создания и применения БПЛА, современный этап их развития, а также анализируются перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в ближайшем будущем.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), применение БПЛА, история БПЛА.*

## HISTORY AND PROSPECTS OF APPLICATION UNMANNED AERIAL VEHICLE

A. A. Filippov\*, E. P. Oleynikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

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

*The history of the creation and use of UAVs, the current stage of their development, as well as the prospects for the use of unmanned aerial vehicles in the near future are analyzed.*

*Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), UAV application, UAV history.*

БПЛА (также БЛА, дрон) – это летательный аппарат без экипажа на борту.

БПЛА могут обладать различной степенью автономности. Одни требуют постоянного дистанционного управления (ДПЛА), для управления другими требуется лишь эпизодическая подача управляющих команд, третьи способны выполнять задачи полностью в автоматическом режиме. В связи с такими различиями иногда рекомендуется употреблять более широкий термин БПАС – беспилотная авиационная система, включающая в себя как сам аппарат, так и средства связи и управления им.

Первые разработки беспилотных аппаратов относятся к началу – первой половине XX века. В то время стремительное развитие авиационных технологий и радиоэлектронных систем создало благоприятную основу для многочисленных экспериментов с БПЛА. К первым беспилотникам можно отнести: радиоуправляемый самолет Curtiss F-5L (1924), мишень многократного использования «Queen Bee» (Великобритания, 1933), БПЛА «Radioplane OQ-2» (США, 1941–1945), планеры специального назначения ПСН-1 и ПСН-2 (СССР, 1930–1940 гг.) и др. аппараты.

Все они имели исключительно военное назначение. Основными их задачами являлись доставка большого количества взрывчатых веществ к цели и последующее ее уничтожение путем самоликвидации (самолеты-снаряды, планирующие авиабомбы, первые прототипы крылатых ракет), ведение разведки различными способами (аэрофотосъемка, радиолокационная разведка и т. п.), использование в военно-учебных целях (движущиеся мишени, макеты, прототипы и пр.). Эти и другие задачи стали основными для БПЛА на долгое время.

В период холодной войны разработка БПЛА с расчетом на их применение исключительно в военных целях продолжилась. Примерами могут служить советские разведывательные БПЛА Ла-17, Ту-123 «Ястреб», Ту-141 «Стриж», Ту-143 «Рейс», Ту-243, а также американские «DASH», «RQ-2 Pioneer», «Ryan Model 147A Fire Fly» и др.

В наше время (начиная с 1990-х гг.) в России разработке БПЛА различного назначения уделяется не столь много внимания, как раньше, наметилось определенное отставание в конструировании и практическом использовании БПЛА. Несмотря на это все же ведутся опытно-конструкторские работы по созданию как легких, так и тяжелых аппаратов. Среди перспективных БПЛА отечественного производства можно выделить аппараты «Застава», «Форпост», «Орлан-10», относящиеся к легкому разведывательному классу, и тяжелые разведывательно-ударные «Дозор-600» и «Альтиус» («Альтаир»). Наиболее же известны средние и тяжелые боевые беспилотные аппараты США, неоднократно применявшиеся в различных военных конфликтах: «MQ-1 Predator», «MQ-9 Reaper», «RQ-4 Global Hawk» – и легкие разведывательные БПЛА, такие как «RQ-11 Raven», «Wasp III», «RQ-20 Puma» и «RQ-16 T-Hawk». Кроме того, свои собственные БПЛА разрабатывают прежде всего Израиль, Китай, а также другие страны.

Бурному развитию БПЛА способствует ряд их преимуществ перед традиционной пилотируемой авиацией. Прежде всего это значительно меньшая стоимость производства и эксплуатационных затрат в сравнении с боевыми самолетами, что позволяет армии иметь на вооружении намного больше беспилотников, чем традиционных самолетов. Также нема-



ловажным фактором является практически полная безопасность для оператора. Отсутствие риска для квалифицированных специалистов уменьшает потери личного состава и сохраняет военный потенциал армии в целом. Кроме того, БПЛА в силу особенностей своей конструкции, меньших размеров и отсутствия человека на борту могут быть более эффективны в смысле относительной полезной нагрузки, радиолокационной заметности и возможности выполнять маневры, перегрузки при которых превышают возможности человеческого организма [1–5].

Появляются новые тенденции в разработке беспилотников. Совершенствуется их конструкция, применяются современные материалы, проводятся эксперименты с новыми типами двигательных установок, но самое главное – совершенствуется бортовая электроника БПЛА. Так, настоящим толчком в развитии беспилотных аппаратов стало создание спутниковых навигационных систем (например, GPS, Глонасс). На данный момент искусственный интеллект летательных аппаратов позволяет им не просто ориентироваться в пространстве и выполнять команды заранее созданной программы или отданные оператором, а анализировать складывающуюся боевую обстановку и в соответствии с этим автоматически изменять параметры полета. Растущие возможности БПЛА – их автономность, способность автоматической дозаправки в воздухе и автоматической посадки – позволяют странам НАТО рассматривать БПЛА в будущих войнах уже не как вспомогательное средство разведки и корректировки артиллерийских и ракетно-бомбовых ударов, а как основную эффективную ударную силу.

Также развитие науки и техники, миниатюризация механических и электронных узлов и агрегатов и снижение стоимости сделали БПЛА пригодными и для гражданского рынка, который стал стремительно развиваться. В наши дни беспилотники используются для кино съемки, фото- и видеосъемки, доставки грузов и почты, перевозки пассажиров, в промышленности; организовываются спортивные соревнования по управлению дронами. Очевидно, что сфера их

применения будет постоянно расширяться и охватывать ранее совершенно не свойственные для БПЛА задачи.

### Библиографические ссылки

1. Макаров И. В., Кокорин В. И. Комплекс управления беспилотными летательными аппаратами для дистанционного зондирования Земли. Красноярск : СФУ, 2010.
2. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты. М. : Попурри, 2012.
3. Сильвестров М. М. Автоматизация управления летательными аппаратами с учетом человеческого фактора. М. : Машиностроение, 2013.
4. Павлушенко М. И., Евстафьев Г. М., Макаренко И. К. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. М. : Права человека, 2005. 612 с.
5. Интернет-ресурс [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный\\_летательный\\_аппарат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_летательный_аппарат) (дата обращения: 10.08.2019).

### References

1. Makarov I. V., Kokorin V. I. Control complex for unmanned aerial vehicles for remote sensing of the Earth. Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2010.
2. Vasilin N. Ya. Unmanned aerial vehicles. Moscow, Potpourri, 2012.
3. Silvestrov M. M. Automation of control of aircraft taking into account the human factor. Moscow, Engineering, 2013.
4. Pavlushenko M. I., Evstafiev G. M., Makarenko I. K. Unmanned aerial vehicles: history, application, the threat of proliferation and development prospects. Moscow, Human Rights, 2005. 612 p.
5. Internet resource [Electronic resource]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_aerial\\_vehicle](https://ru.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle) (access: 08/10/2019).

© Филиппов А. А., Олейников Е. П., 2019



**Секция**

**«ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА  
В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

УДК 62.752, 621.534;833; 888.6, 629.4.015;02

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПОДВЕСКИ ОБЪЕКТА ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Р. С. Большаков, С. В. Елисеев

Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15  
E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*Предлагается метод оценки динамического состояния технического объекта на основе контроля за соотношением параметров динамических реакций связей при помощи изменения жёсткости составляющих элементов.*

*Ключевые слова: механическая колебательная система с твёрдым телом, динамическое состояние, реакции связей.*

## ESTIMATION FEATURES OF DYNAMICAL CONDITION OF SUSPENSION OBJECT SYSTEM AT VIBRATION DISTURBANCE

R. S. Bolshakov, S. V. Eliseev

Irkutsk State Transport University  
15, Chernishevskiy Str., 664074, Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*Control of dynamical condition of technical object on base of parameters control for the ratio of dynamical responses of ties by means of stiffness change of composing elements.*

*Keywords: mechanical oscillation system with rigid body, dynamical condition, ties responses.*

**Введение.** Динамическое состояние технических объектов, работающих в условиях интенсивного вибрационного нагружения, существенным образом влияет на надежность и безопасность эксплуатации оборудования. Вопросы оценки динамических состояний различных объектов, разработки способов и средств, нашли отражение в работах [1–3]. Технические средства, использование которых снижает уровень вибрации, передаваемых на объекты вибрационной защиты, достаточно разнообразны и представлены специальными устройствами в виде амортизаторов, демпферов, гасителей колебаний и др. [4; 5].

В предлагаемом докладе рассматриваются особенности оценки динамического состояния технического объекта при введении в структуру его подвески устройства для преобразования движения.

**I. Общие положения. Постановка задачи.** Технический объект, работающий при вибрационном воздействии, в виде твердого тела, совершающего вертикальные колебания на упругих опорах, может быть представлен, как показано на рисунке *a* (т.т.  $(A)$ ,  $(A_1)$ ,  $(B)$ – $(B_2)$  – характерные точки, в которых возникают реакции связей), механической колебательной системой; в состав системы входят две упругие ветви: одна определяется последовательным соединением упругого элемента  $k_1$  и блока из параллельно работающих пружины  $k_2$  и устройства для преобразования движения с приведенной массой  $L$ . Структурная схема эквивалентной в динамическом

отношении системы автоматического управления приведена на рисунке *б*.

Характерными точками соединения трех элементов ветви, являются т.т.  $(B)$ ,  $(B_1)$ ,  $(B_2)$ . Вторая упругая ветвь представлена пружиной жесткость  $k_3$  с характерными точками присоединения т.т.  $(A)$  и т.т.  $(A_1)$ . Опорная поверхность совершает гармонические вибрации  $z(t)$ . Предполагается, что система обладает линейными свойствами и совершает колебания относительно положения статического равновесия. Система координат связана с неподвижным базисом; силы сопротивления полагаются исчезающими малыми.

Математическая модель технического объекта (см. рисунок, *a*) может быть представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка с постоянными коэффициентами. После составления выражений для кинетической и потенциальной энергий и последующего формирования дифференциальных уравнений движения воспользуемся преобразованием Лапласа при нулевых начальных условиях, после чего система уравнений может быть представлена в операторной форме

$$\bar{y}_1[Lp^2 + (k_1 + k_2)] - \bar{y}_2(Lp^2 + k_2) = k_1\bar{z}, \quad (1)$$

$$\bar{y}_2[(m + L)p^2 + k_2 + k_3] - \bar{y}_1(Lp^2 + k_2) = k_3\bar{z}, \quad (2)$$

где  $p = j\omega$  – комплексная переменная ( $j = \sqrt{-1}$ ); значок  $\langle - \rangle$  над переменной означает ее изображение по Лапласу [1; 3].

**II. Особенности динамических свойств.** На основе представлений о смещениях по координатам движения и динамических жесткостях динамические реакции связей в характерных точках системы могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} |\bar{R}_A| = |\bar{R}_{A1}| = k_3 \cdot \bar{y}_2, \quad |\bar{R}_B| = |\bar{R}_{B1}| = k_1 \cdot \bar{y}_1, \\ |\bar{R}_{B2}| = \bar{k}_{np} \cdot \bar{y}_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 = W_1(p)\bar{z}, \quad \bar{y}_2 = W_2(p)\bar{z}, \\ \bar{k}_{np}(p) = k_3 + \frac{k_1(Lp^2 + k_2)}{Lp^2 + k_1 + k_2}. \end{aligned}$$

Динамическая жесткость  $\bar{k}_{np}$  может быть определена так же, как передаточная функция отрицательной цепи обратной связи при преобразовании структурной схемы, что также можно представить в виде

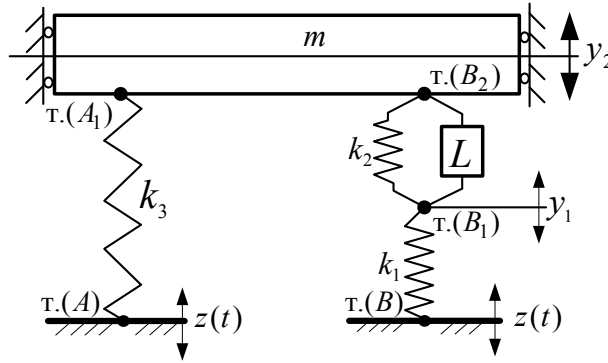
$$\bar{k}_{np}(p) = \frac{(Lp^2 + k_2 + k_3)(Lp^2 + k_1 + k_2) - (Lp^2 + k_2)^2}{Lp^2 + k_1 + k_2}. \quad (4)$$

Для характеристики свойств подвески вводится передаточная функция динамических связей между реакциями опорной поверхности  $|\bar{R}_{опор}|$  и реакций

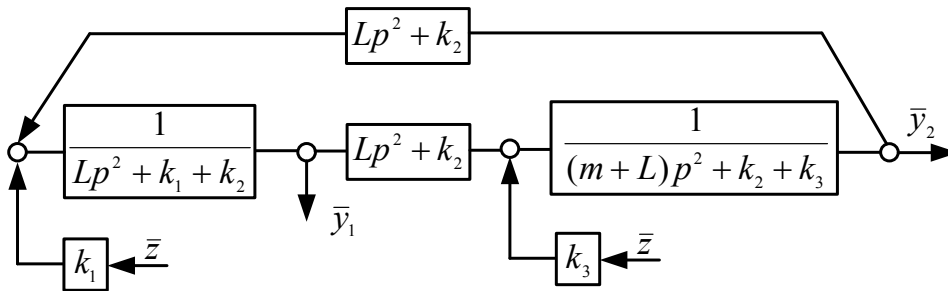
связей  $|\bar{R}_{m2}|$ , создаваемых внешним кинематическим возмущением  $\bar{z}$

$$N(\omega) = \frac{|\bar{R}_{m2}|}{|\bar{R}_{опор}|} = \frac{[Lp^2(k_1 + k_3) + k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3]^2}{\{[k_3^2L + k_1^2(m + L) + 2k_1k_3L]p^2 + k_3^2(k_1 + k_2) + k_1^2(k_2 + k_3) + 2k_1k_2k_3\} \cdot (Lp^2 + k_1 + k_2)} \quad (5)$$

**Заключение.** Таким образом, предлагаемый подход в оценке динамического состояния имеет теоретические основы, позволяющие разрабатывать соответствующие алгоритмы управления. Метод изменения динамического состояния основан на рассмотрении соотношений динамических реакций связей между составляющими элементами при контакте одновременно как с объектом защиты, так и с основанием. Отношение амплитуд динамических реакций предлагается как форма контроля за формированием необходимых условий. Если отношение реакций меньше единицы, то вибрационное возмущение, поступающее со стороны опорной поверхности уменьшается. При нулевом значении отношения вибрационное воздействие не проходит на объект и «рассеивается» при динамических взаимодействиях.



a



b

Расчётная (a) и структурная (б) схема технического объекта

**Библиографические ссылки**

1. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных мех. систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
2. Елисеев С. В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование. Иркутск : ИрГУПС, 2018. 692 с.
3. Кашуба В. Б., Елисеев С. В., Большаков Р. С. Динамические реакции в соединениях элементов механических колебательных систем. Новосибирск : Наука, 2016. 331 с.
4. Елисеев С. В., Ермошенко Ю. В., Большаков Р. С. Рычажные связи в динамических взаимодействиях механических колебательных систем с двумя степенями свободы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-2 (40). С. 6–12.
5. Елисеев С. В., Ермошенко Ю. В., Большаков Р. С. Обобщенная теория динамического гасителя колебаний в системе с несколькими степенями свободы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 45–52.

**References**

1. Eliseev S. V., Artyunin A. I. Applied theory of oscillations in tasks of linear mechanical systems Novosibirsk : Science, 2016. 459 p.
2. Eliseev S. V. Applied system analysis and structural mathematical modeling. Irkutsk : ISTU, 2018. 692 p.
3. Kashuba V. B., Eliseev S. V., Bolshakov R. S. Dynamical responses in connections of elements of mechanical oscillation systems. Novosibirsk : Science, 2016. 331 p.
4. Eliseev S. V., Ermoshenko Yu. V., Bolshakov R. S. Lever ties in dynamical interactions of mechanical oscillation systems with freedom degrees // News of Southwestern State University. 2012. № 1-2 (40). P. 6–12.
5. Eliseev S. V., Ermoshenko Yu. V., Bolshakov R. S. The generalized theory of a dynamic oscillation absorber in a system with several freedom degrees // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. № 1 (29). P. 45–52.

© Большаков Р. С., Елисеев С. В., 2019

УДК 621.923.4

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Е. К. Васильева, Н. К. Новосельский, А. С. Сысоев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

*Статья посвящена исследованию метода обеспечения точности при современном уровне абразивно-экструзионной обработки.*

*Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, зернистость, шероховатость.*

## MAKING ACCURACY IN ABRASIVE-EXTRUSION PROCESSING

E. K. Vasileva, N. K. Novoselsky, A. S. Sysoev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

*This article is devoted to the study of the method of ensuring accuracy at the modern level of abrasive extrusion.*

*Keywords: abrasive extrusion processing, granularity, roughness.*

В настоящее время, все в больший спектр потребностей отрасли машиностроения, входят детали и изделия со сложнопрофильными поверхностями, к которым относятся детали летательных аппаратов, двигатели внутреннего сгорания, а также инструментные оснастки для металлургического и заготовительного производства.

Так, лабораторией отделочных методов СибГАУ (в настоящее время – СибГУ им. М. Ф. Решетнева) совместно со специалистами ОАО «Красмаш» проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, по изучению процесса абразивно-экструзионной обработки (АЭО), направленных на разработку теоретических основ расчета точности, качества и эффективности АЭО при изготовлении конкретных деталей [1].

Результатом данной работы являлось расчетная методика, позволяющая сократить затраты на технологическую подготовку производства при использовании метода АЭО. Данная методика включает в себя 6 этапов обработки детали, конечным этапом которого является верификация расчетов при помощи моделирования процесса АЭО, а также экспериментальная отработка технологии на образцах с использованием опытно-промышленного оборудования.

Авторами данного исследования была разделена область изучения АЭО, в которой необходимо было выбрать тип данной обрабатываемой поверхности: наружную или внутреннюю; при обработке наружных поверхностей деталь должна помещаться в приспособление, внутренняя поверхность которого образывала с ней канал, по которому будет продавливаться рабочая среда.

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из стали 12X18H10T с размерами 4×24×75 и собрана экспериментальная установка (рис. 1), где в данных образцах просверлили по три базовых отверстия глубиной 2 мм.

Результаты эксперимента по определению влияния режимов обработки на шероховатость поверхности, показали, что при максимальных значениях показателей (давление масла в управляющей полости рабочих камер, величины абразива, концентрация рабочей смеси) заданный съём материала с дефектной поверхности исследуемого образца глубиной 120 мкм удаётся за 120 циклов [2].

При анализе экспериментальных данных [2] обнаружено, что меньшая шероховатость за 50 циклов обработки поверхности опытного образца достигается при абразиве 500 мкм с его концентрацией в рабочей смеси 80 %.

В ходе анализа методики было обнаружено уменьшение шероховатости на обрабатываемом участке при использовании абразива меньшей зернистости, при этом потребуется большее количество циклов для удаления дефектного слоя. В данном случае было также замечено, что наибольшая выгода достигается при использовании абразива различной зернистости. Так как при применении абразива 500 мкм в рабочей среде не удаётся достичь шероховатости меньшей 3 мкм, наиболее рационально использовать последовательно абразивы различной зернистости.

Таким образом, для повышения точности поверхности следует применять ступенчатую обработку с использованием различных по зернистости абразивов [3].

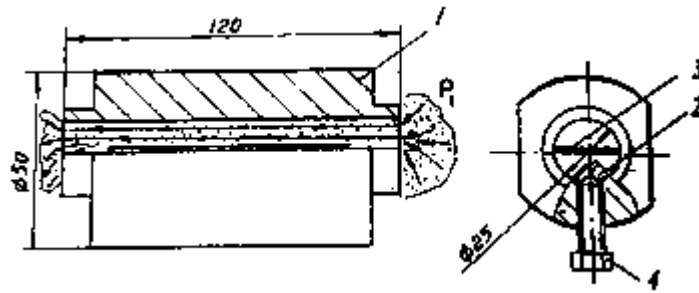


Рис. 1. Приспособление для проведения экспериментов:  
1 – корпус; 2 – вставка; 3 – образец

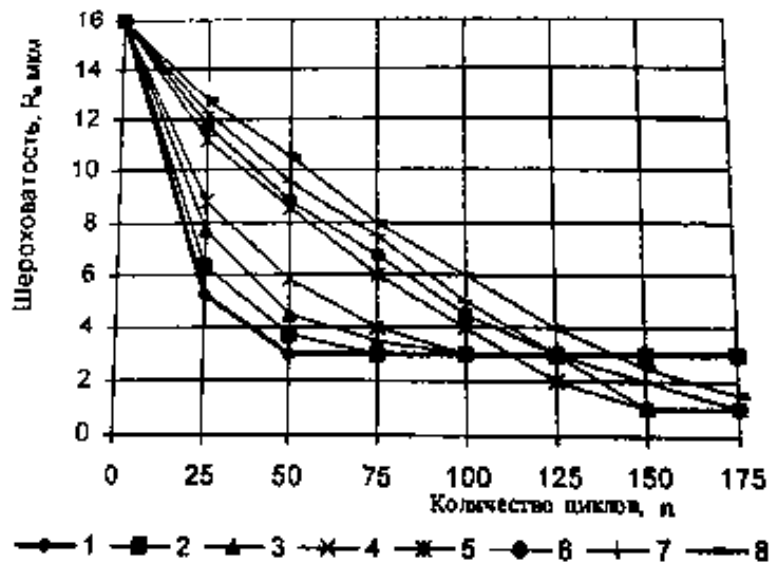


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности образца  $R_a$  от количества циклов  $n$ :  
1 –  $k_a = 80\%$ ,  $P = 12$  МПа; 2 –  $k_a = 80\%$ ,  $P = 8$  МПа; 3 –  $k_a = 66\%$ ,  $P = 12$  МПа;  
4 –  $k_a = 66\%$ ,  $P = 8$  МПа; 5 –  $k_a = 80\%$ ,  $P = 12$  МПа; 6 –  $k_a = 80\%$ ,  $P = 8$  МПа;  
7 –  $k_a = 66\%$ ,  $P = 12$  МПа; 8 –  $k_a = 66\%$ ,  $P = 8$  МПа

*Примечание.* Кривые 1, 2, 3, 4 построены при величине абразива  $B_a = 500$  мкм, а 5, 6, 7, 8 при  $B_a = 250$  мкм,  $k_a$  – концентрация абразива в рабочей смеси.

Зернистость абразива выбирается в зависимости от следующих факторов (рис. 2):

- количества снимаемого при обработке материала;
- требуемого класса шероховатости и точности обработки поверхности;
- физических свойств обрабатываемого материала;

С уменьшением размера абразивных зерен повышается их режущая способность за счет возрастания числа зерен на единице рабочей поверхности, уменьшения радиусов округления зерен, меньшего износа отдельных зерен [4]. Однако уменьшение размера зерен приводит к необходимости снижения глубины и величины снимаемого на операции припуска. Чем мельче абразивные зерна, тем меньше в единицу времени снимается материала с обрабатываемой детали.

Наполнение среды абразивными частицами значительно меняют характеристики полимерной основы,

такие как вязкость, релаксационные и высокоэластические свойства касательные и нормальные напряжения при сдвиге, скорость деформации [5].

Таким образом, точность поверхности достигается применением направляющих приспособлений, производительность же, в свою очередь, зернистостью.

#### Библиографические ссылки

1. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко, М. А. Лубнин, С. К. Сысоев и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2009. С. 173–178.
2. Сысоев С. К., Сысоев А. С., Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов: теория, исследования, практика : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. С. 92–98.

3. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М. : Машиностроение ; Москва, 2000. С. 270–276.

4. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Сибирский журнал науки и технологий. 2005. С. 96–99.

5. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка: современный уровень и теоретические основы процесса : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. С. 168.

#### References

1. Metodika ocenki tochnosti, kachestva i jeffektivnosti abrazivno-jekstruzionnoj obrabotki detalej / V. A. Levko, M. A. Lubnin, S. K. Sysoev et al. // Sibirskij zhurnal nauki i tehnologij. 2009. P. 173–178.

2. Sysoev S. K., Sysoev A. S. Jekstruzionnoe honingovanie detalej letatel'nyh apparatov: teorija, issledovanija, praktika : monogr. / Sib. gos. ajerokosmich. unt. Krasnojarsk, 2005. P. 92–98.

3. Suslov A. G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin. M. : Mashinostroenie ; Moskva, 2000. P. 270–276.

4. Levko V. A. Osobennosti reologii rabochej sredy pri abrazivno-jekstruzionnoj obrabotke // Sibirskij zhurnal nauki i tehnologij. 2005. P. 96–99.

5. Levko V. A. Abrazivno-jekstruzionnaja obrabotka: sovremennyj uroven' i teoreticheskie osnovy processa: monogr. / Sib. gos. ajerokosmich. unt. Krasnojarsk, 2007. P. 168.

© Васильева Е. К., Новосельский Н. К.,  
Сысоев А. С., 2019



## ПРИМЕНЕНИЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИВОДА КОЛЕСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

М. А. Деунежева, Е. А. Терина, А. К. Тутушкин, А. М. Терин, А. А. Фадеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: marianna.deunezheva@mail.ru

*Рассматриваются вопросы применения риск-ориентированного подхода при испытаниях перспективного привода колеса летательного аппарата.*

*Ключевые слова: испытания, аппарат, анализ, риски, последствия.*

## APPLICATION OF THE RISK-ORIENTED APPROACH IN TESTS OF THE PERSPECTIVE DRIVE OF A WHEEL OF THE AIRCRAFT

M. A. Deunezheva, E. A. Terina, A. K. Tutushckin, A. M. Terin, A. A. Fadeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: marianna.deunezheva@mail.ru

*The paper deals with the application of risk-based approach in the testing of advanced wheel drive aircraft.*

*Keywords: tests, apparatus, analysis, risks, consequences.*

Для эксплуатации перспективного привода колеса летательного аппарата необходимо провести анализ рисков и выявить причины возникновения неполадок в работе, а также исход этих рисков [1].

Одним из перспективных конструкций является мотор-редуктор, встраиваемый в колесо (см. рисунок) [1]. Редуктор состоит из большого центрального колеса 1, пяти сателлитов 2, установленных на осях 3, малого центрального колеса 4.

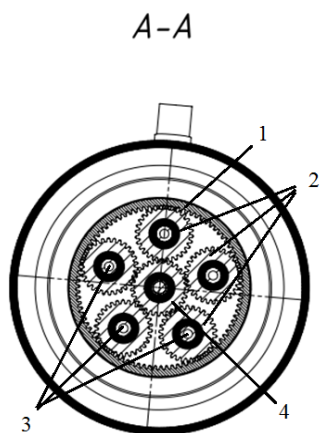


Схема расположения редуктора в колесе шасси (пример)

Электромагнитная система представляет собой бесколлекторный вентильный двигатель-генератор постоянного тока обращенной конструкции.

Внутренняя часть двигателя-генератора неподвижна (статор), на зубцах которого располагаются катушки фаз, а внешняя часть подвижная (ротор), представляет собой магниты, расположенные по окружности.

Двигатель-генератор встраивается в каждое из зубчатых колес сателлита (5 или 7 для каждой передачи). Предполагается что двигатель – генератор будет запитан от бортовой системы питания постоянного напряжения 28В [2].

На примере испытаний перспективного привода колеса летательного аппарата выявим нежелательные рисковые события и их последствия, которые могут привести к выводу из строя оборудования, а также неправильной работе [3–5].

Для этого выполним анализ уровней защиты путем выявления опасной ситуации, идентификации причин появления и возможных последствий. Пример результатов анализа приведен в таблице.

Применение риск-ориентированного подхода в испытаниях привода колеса летательного аппарата позволит повысить качество работы оборудования, а также сократить риски опасные для дальнейшей эксплуатации.

## Результаты анализа уровня защиты

№	Сценарий		Защитные меры (меры по снижению риска)	
	Опасные ситуации	Опасные события		
		Причина		Последствия
1	Выход из строя оборудования (при проведении испытания нарушается работа оборудования полностью или частично)	1. Воздействие внешних факторов (условия окружающей среды). 2. Неправильное применение оборудования	1. Выдача недостоверных результатов заказчику. 2. Прерывание испытания. 3. Затраты на покупку нового оборудования	1. Следить за межповерочными интервалами. 2. При долгом хранении в законсервированном состоянии оборудования, проводить внеочередную поверку. 3. При условиях долгой транспортировки, проводить внеочередную поверку
2	При проведении испытания нарушены условия работы	1. Нарушение работы источников энергии. 2. Неправильно сформулированная документация технических требований	1. Выдача недостоверных результатов заказчику. 2. Временные затраты на переработку технической документации	1. Контролировать условия окружающей среды в постоянном режиме. 2. Составлять техническую документацию в соответствии с требованиями нормативных документов
3	Повышенный износ шестерни при неправильной эксплуатации	1. Повышенные перегрузки. 2. Недостаточные условия смазывания	1. Неправильная работа оборудования. 2. Выход из строя оборудования	1. Нагрузка в пределах номинальной. 2. Достаточная смазка
4	Повреждение обмоток двигателя	1. Неправильная эксплуатация (короткое замыкание, перегрузки)	1. Выход из строя оборудования	1. Работа с номинальными режимами. 2. Использование электрозщитных устройств. 3. Принцип резервирования

## Библиографические ссылки

- ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М. : Изд-во стандартов, 2012.
- Надараиа Ц. Г., Шестаков И. Я., Фадеев А. А. Привод колеса шасси самолёта // Вестник МАИ. 2017. Т. 24, № 3. С. 109–112.
- Анализ риска опасностей для подтверждения соответствия: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://test-e.ru/ru/company/useful-information/risk-analysis-for-conformity-assessment/> (дата обращения: 07.09.2019).
- Системы, методы и инструменты менеджмента качества : учебное пособие / М. М. Кане, Б. В. Иванов, В. Н. Корешков, А. Г. Схиртладзе. СПб. : Питер, 2008.
- ГОСТ Р 51897–2011. Руководство ИСО 73:2009 «Менеджмент риска. Термины и определения». М. : Изд-во стандартов, 2011.

## References

- GOST R ISO/IEC 31010–2011. Management of risk. Risk assessment methods. Moscow, Publishing house of standards, 2012.
- Nadaraja C. G., Shestakov I. Y., Fadeev A. A. [Aircraft landing gear wheel actuator] // *Vestnik MAI*. 2017. T. 24, № 3. P. 109–112 (In Russ.)
- Risk analysis dangers to confirm compliance with: a website [Electronic resource]. URL: <https://test-e.ru/ru/company/useful-information/risk-analysis-for-conformity-assessment/> (accessed: 07.09.2019).
- Systems, methods and tools of quality management : textbook / M. M. Kane, B. V. Ivanov, V. N. Koreshkov, A. G. Skhirtladze. SPb. : Peter, 2008.
- GOST R 51897–2011. ISO Guide 73:2009 “Risk Management. Terms and definitions”. Moscow, Publishing house of standards, 2011.

© Деунежева М. А., Терина Е. А., Тутушкин А. К., Терин А. М., Фадеев А. А., 2019

УДК 67.02

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ф. Д. Евсеев, А. И. Громаков, М. М. Михнёв

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: fedyaevseev@yandex.ru

*Производится отработка технологии изготовления деталей методом литья по выплавляемым моделям с применением восковых моделей, изготовленных с помощью аддитивных технологий.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, литье деталей.*

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF CASTING ITEMS WITH THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

F. D. Evseev<sup>1</sup>, A. I. Gromakov<sup>2</sup>, M. M. Mihnev<sup>3</sup>

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: fedyaevseev@yandex.ru

*A technology is being developed for manufacturing parts by investment casting using wax models made using additive technologies.*

*Keywords: additive technologies, casting.*

Основной целью отработки является изготовление деталей типа кронштейн и уголок методом литья по выплавляемым моделям с применением восковых моделей, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Аддитивные технологии производства позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели. Такой процесс прототипирования объекта также называют «выращиванием» из-за постепенности изготовления. При традиционном производстве от имеющейся заготовки либо отсекается все лишнее, либо деформируется сама заготовка, то в случае с аддитивными технологиями из ничего (а точнее, из аморфного расходного материала) выстраивается новое изделие [1].

Поскольку метод литья по выплавляемым моделям имеет ряд специфических особенностей, то имеет смысл проводить отработку поэтапно, анализируя опыт предыдущих испытаний.

**Этап 1.** Изготовлены восковые модели отливок, кронштейн – 5 шт., уголок – 5 шт. на 3D-принтере (рис. 1).

На восковых моделях присутствовали риски, забоины, расслоение воска. Фактические размеры восковых моделей соответствуют требованию конструкторской документации.

**Этап 2.** Производился расчет и отработка 8 типов литниково-питающей системы (ЛПС).

Для массивных отливок типа кронштейн выбран тип ЛПС – центральный стояк с верхней прибылью (рис. 2). Назначением прибыли является подпитыва-

ние отливки жидким металлическим расплавом в ходе его затвердевания.

Для тонкостенных отливок типа уголок применялся тип ЛПС – центральный стояк. При отработке пролив металла происходил без дефектов.

Заливка опок с блоками моделей осуществлялась формовочным материалом на вакуумном миксере [2].

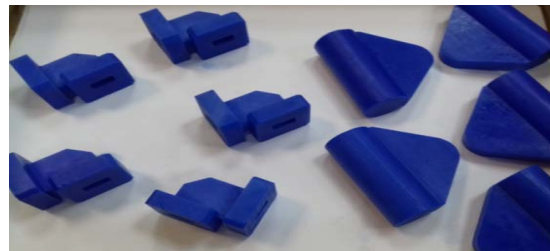


Рис. 1. Восковые модели отливок – уголок и кронштейн

**Этап 3.** Производилась формовка опок, их прокаливание и выплавление модельного состава с соблюдением температурных циклов нагрева для удаления молекул воды и упрочнения формомассы [3; 4].

**Этап 4.** Производилось литье отливок типа (кронштейн, уголок) в прогретые опоки в вакуумной литейной машине, с применением сплава ЛАСВИСС.

ЛАСВИСС – литейный алюминиевый сплав, выпускаемый информационными спутниковыми системами. Сплав имеет температуру начала плавления (солидус) плюс 615–645 °С (см. таблицу) [5].



Рис. 2. Слева – восковая «Елка» с литниковой системой «Тип Центральный стояк», справа – «Тип Верхняя прибыль»

#### Механические свойства сплава

Состояние сплава при выплавке (в литом состоянии) без термической обработки			Состояние сплава после термической обработки (Т1 – закаленное и искусственно состаренное)		
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
225	106	3,2	245–304	141	4,2–8,3

**Этап 5.** Производилась отбивка формомассы и разбор отлитой блок-модели (отделение от деталей литниково-питающей системы). Для улучшения качества поверхности отливки, изделия обрабатываются в электромагнитной галтовочной установке.

**Этап 6.** Производилась механическая обработка деталей в соответствии с разработанными технологическими процессами, включающие в себя фрезерочные и слесарные операции.

Отработана технология получения отливок для деталей типа (кронштейн и уголок), включающая в себя:

- разработку литниково-питающей системы, обеспечивающую требуемую точность формы и минимизирование дефектов литья;
- установление оптимального угла, при креплении восковой модели к питающему стояку, для устранения недоливов;
- установление оптимальной температуры литейной формы и алюминиевого расплава, обеспечивающие хорошую проливаемость;
- отработку технологии финишных операций.

#### Библиографические ссылки

1. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: [http://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech/](http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/) (дата обращения: 29.08.2019).
2. Березюк В. Г., Синичкин А. М., Ларионова Н. А. Технология литейного производства. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. 158 с.

3. Березюк В. Г., Синичкин А. М., Ларионова Н. В. Технология литейного производства. Формовочные материалы : учеб. пособие / Красноярск. гос. техн. ун-т. Красноярск, 2006.

4. Степанов Ю. А., Баландин Г. Ф., Рыбкин В. А. Технология литейного производства: специальные виды литья : учебник. М. : Машиностроение, 1983. 287 с.

5. ТУ 1-30656-2013. Сплав литейный алюминиевый марки ЛАСВИСС. М. : Изд-во стандартов, 2004.

#### References

1. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: [http://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech/](http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/) (accessed :08.29.2019).
2. Berezyuk V. G., Sinichkin A. M., Larionova N. A. Foundry technology. Krasnoyarsk : CPI KSTU, 2006. 158 p.
3. Berezyuk V. G., Sinichkin A. M., Larionova N. V. Technology of foundry. Forming materials: textbook. manual / Krasnoyarsk. state tech. un-t. Krasnoyarsk, 2006.
4. Stepanov Y. A., Balandin G. F., Rybkin V. A. Foundry technology: special types of casting : Textbook. Moscow, Engineering, 1983. 287 p.
5. TU 1-30656–2013 Alloy foundry aluminum brand LASVISS. Moscow, Publishing house of standards, 2014.

© Евсеев Ф. Д., Громаков А. И., Михнёв М. М., 2019

УДК 62.752, 621:534, 629.4.015

## МЕЖПАРЦИАЛЬНЫЕ СВЯЗИ В ФОРМИРОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

С. В. Елисеев<sup>1, a</sup>, Н. К. Кузнецов<sup>2, b</sup>, А. В. Елисеев<sup>3, c</sup>

<sup>1, 3, 4</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15  
<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
E-mail: <sup>a</sup>eliseev\_s@inbox.ru, <sup>b</sup>knik@istu.edu, <sup>c</sup>eavsh@ya.ru

*Рассматриваются возможные формы конструктивно-технических решений в задачах оценки и управления динамическими состояниями технологических и транспортных машин. Получены аналитические соотношения, определяющие особенности формирования распределений амплитуд колебаний точек рабочих органов по их длине.*

*Ключевые слова: передаточные функции, межпарциальные связи, динамическое состояние, дополнительные связи, связность движений.*

## INTERPARTIAL CONNECTIONS IN THE FORMATION OF DYNAMIC STATES OF MECHANICAL OSCILLATORY SYSTEMS WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

S. V. Eliseev<sup>1, a</sup>, N. K. Kuznetsov<sup>2, b</sup>, A. V. Eliseev<sup>3, c</sup>

<sup>1, 3, 4</sup>Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevskiy Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University  
83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
E-mail: <sup>a</sup>eliseev\_s@inbox.ru, <sup>b</sup>knik@istu.edu, <sup>c</sup>eavsh@ya.ru

*The possible forms of constructive-technical solutions in the tasks of evaluation and control of dynamic conditions of technological and transport machines are considered. Analytical relationships have been obtained that determine the features of the formation of oscillation amplitude distributions of the points of the working bodies along their length.*

*Keywords: transfer functions, interpartial connections, dynamic condition, additional ties, motion connection.*

**Введение.** Многие технические объекты технологического назначения работают в условиях интенсивного вибрационного нагружения [1]. Обеспечение надежности работы таких объектов и безопасности эксплуатации требуют решения задач оценки и контроля динамических состояний рабочих органов машин, их элементов и машин в целом при их проектировании. В предлагаемой статье на примере механической колебательной системы с двумя степенями свободы с дополнительными связями в виде рычажных и винтового механизмов приведены результаты исследований влияния межпарциальных связей на динамические состояния технологической машины, работающей в условиях интенсивных нагружений и определены параметры дополнительных связей, обеспечивающие формирования требуемой структуры вибрационного поля машины [2].

Предполагается, что система совершает малые колебания относительно положения статического равновесия. Для решения задачи оценки, контроля и формирования требуемых распределений амплитуд колебаний точек твердого тела по его длине воспользуемся методом структурного математического моделирования [3; 4].

**Особенности формирования распределений амплитуд колебаний точек рабочих органов.** Полученная структурная математическая модель колебательной системы в виде структурной схемы эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления, показана на рисунке [5; 6].

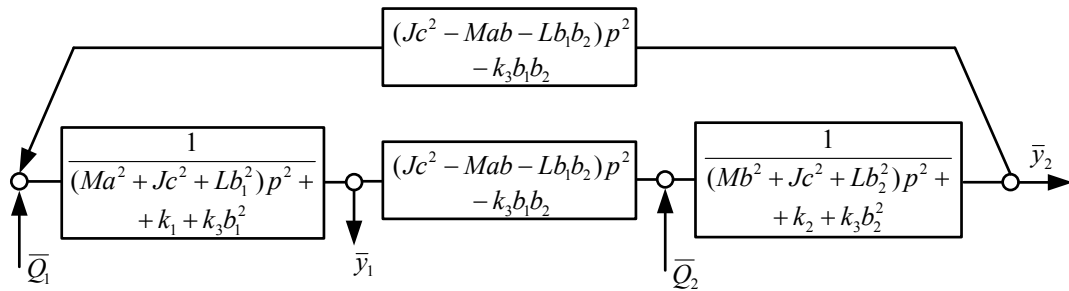
На основе структурной схемы введем в рассмотрение передаточные функции по внешним силовым возмущениям  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$ , полагая, что они связаны между собой соотношением

$$\bar{Q}_2 = \alpha \cdot \bar{Q}_1, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент связности между внешними возмущениями.

На основе передаточных функций, связывающих координаты  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$  с силовыми воздействиями, найдем передаточную функцию межпарциальной связи между координатами  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$ :

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha[(Mc^2 + Jc^2 + Lb_1^2)p^2 + k_1 + k_3b_1^2] + [(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]}{(Mb^2 + Jc^2 + Lb_2^2)p^2 + k_2 + k_3b_2^2 + \alpha[(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]} = i. \quad (2)$$



Структурная математическая модель колебательной системы

Действие двух сил  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  можно заменить одной силой  $\bar{Q}_0$ . Из выражения (2), в частности, можно найти частоту, для определения коэффициента связности  $\alpha$  и других параметров системы

$$\omega_i^2 = \frac{\alpha k_1 - ik_2 + k_3(b_1 + ib_2)(\alpha b_1 - b_2)}{M(\alpha a - b)(a + ib) + Jc^2(\alpha + 1)(1 - i) + L(b_1 + ib_2)(\alpha b_1 - b_2)}. \quad (3)$$

**Заключение.** На основе метода структурного математического моделирования и аппарата передаточных функций исследовано влияние межпарциальных связей на динамические свойства механической колебательной системы с двумя степенями свободы с дополнительными связями в виде рычажных и винтового механизмов. Получены аналитические соотношения между параметрами исходной колебательной системы и дополнительных связей, обеспечивающие необходимые динамические состояния технологической машины, в том числе и получение однородного вибрационного поля, не зависящего от частоты силовых возмущений. Показано, что использование дополнительных связей расширяет возможности целенаправленного формирования требуемой структуры вибрационного поля технологической машины. Предлагаемый подход может быть использован, в частности, для определения рациональных параметров вибрационного технологического оборудования различного назначения без изготовления опытных образцов этого оборудования и проведения натурных испытаний.

#### Библиографические ссылки

1. Пановко Г. Я. Динамика вибрационных технологических процессов. М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных технологий, 2006. 176 с.
2. Елисеев А. В., Сельвинский В. В., Елисеев С. В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неустойчивых связей : монография. Новосибирск : Наука, 2015. 332 с.
3. Вьюнг К. Ч., Ковригина И. В., Елисеев С. В. Механизмы в структуре механической колебательной системы: возможности формирования динамических состояний // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 13–18.
4. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев и др. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2008. 523 с.
5. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.

6. Елисеев С. В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск : ИрГУПС, 2018. 692 с.

#### References

1. Panovko G. Ya. *Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Dynamics of vibration technological processes]. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2006. 176 p. (In Russ.)
2. Eliseev A. V., Sel'vinski V. V., Eliseev S. V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeistviy elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivayushikh svyazei* [Dynamics of vibrational interactions of elements of technological systems with regard to non-retaining connections]. Novosibirsk : Nauka, 2015. 332 p. (In Russ.)
3. Vuong Q. T., Kovrigina I. V., Eliseev S. V. *Mekhanizmy v strukture mekhanicheskoi kolebatel'noi systemyi: vozmozhnosti formirovaniya dinamicheskikh sostoyanii* [Mechanisms in the structure of a mechanical oscillatory system: possibilities of forming dynamic states] *Systemyi. Metody. Tekhnologii.* (Systems. Methods. Technologies). 2018. № 2 (38). P. 13–18 (In Russ.)
4. *Dinamicheskiy sintez v obobshenykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob'ektov* [Dynamic synthesis in generalized tasks of vibration protection and vibration isolation of technical objects] / S. V. Eliseev et al. Irkutsk : pub. IGU, 2008. 523 p. (In Russ.)
5. Eliseev S. V., Artyunin A. I. *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineinykh mekhanicheskikh sistem* [Applied theory of oscillations in problems of the dynamics of linear mechanical systems]. Novosibirsk : Nauka, 2016. 459 p. (In Russ.)
6. Eliseev S. V. *Prikladnoi systemnyi analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizhenii, vibratsionnyye vzaimodeistviya, ryuchazhnyye svyazi)* [Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of motions, vibrational interactions, lever linkages)]. Irkutsk: IrGUPS, 2018. 692 p. (In Russ.)

© Елисеев С. В., Кузнецов Н. К.,  
Елисеев А. В., 2019

УДК 621.372.83.001.24

## THE USE OF LOW-TEMPERATURE SOLDERING IN THE MANUFACTURE OF WAVEGUIDE-DISTRIBUTION PATHS OF COMMUNICATION SPACECRAFT

R. V. Zaitsev, I. A. Skachkov, S. K. Zlobin

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

*The problem of manufacturing a high-quality waveguide-distribution path with the preservation of the mass of the finished product in the required range and ensuring the quality of the coating is considered.*

*Keywords: soldering, waveguide-distributive tracts, induction heating.*

## ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОЛНОВОДНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Р. В. Зайцев, И. А. Скачков, С. К. Злобин

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

*Рассмотрена проблема изготовления качественного волноводно-распределительного тракта с сохранением массы готового изделия в необходимом диапазоне и обеспечением качества покрытия.*

*Ключевые слова: пайка, волноводно-распределительные тракты, индукционный нагрев.*

JSC ISS manufactures aluminum waveguide paths designed for receiving and transmitting electric waves from antennas to switching devices. Connections of flanges, couplings, angles and waveguide tubes are carried out by soldering using induction heating in the air with an active flux. Soldering is performed by high-temperature solder based on eutectic silumin (SIL1S, AK12, AK12TS10, etc.)

Specialists of Reshetnev University and JSC ISS have created an automated equipment complex for induction soldering, which allows reproducing the required technological parameters of heating with high precision. The use of non-contact pyrometric sensors allowed temperature measurements at various points of the heated product directly during the soldering process. The feedback system made it possible to stabilize the soldering process by changing the power supplied to the inductor. This prevented heating of soldered parts above critical temperatures.

As a result of the work, the soldering technology of flanges and couplings to waveguide tubes with the following sections was put into production:  $61 \times 10 \times 10,4$ ;  $58 \times 25 \times 1,4$ ;  $35 \times 15 \times 1,2$ ;  $28,5 \times 12,6 \times 1,2$ ;  $23 \times 10 \times 1$ ;  $19 \times 9,5 \times 0,65$ ;  $19 \times 9,5 \times 0,8$ ;  $19 \times 9,5 \times 1$ ;  $19 \times 9,5 \times 1,2$ ;  $16 \times 8 \times 1,2$ ;  $13 \times 6,5 \times 1,2$ ;  $11 \times 5,5 \times 1,2$  mm, as well as with import pipes of section of an inch row. Wall thicknesses of pipe ranges from 0.65 mm to 1.4 mm. Soldering of pipes with a wall thickness of 0.5 mm is also possible.

The soldering technology of the improved design of cast and welded corners, couplings and flanges has been

developed, which allows to obtain a guaranteed clearance for soldering (0.1 mm) and to center the pipes with each other.

Induction-based soldering allows to obtain waveguide paths with a length of 1000-1200 mm due to the use of couplings, angles, etc. In connection to this, certain difficulties arise in the late stages of the manufacture of the waveguides paths.

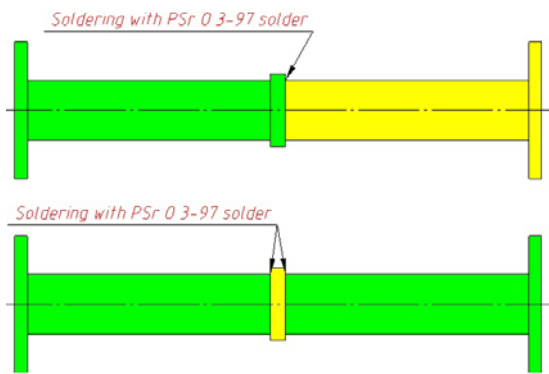
Coating of a silver coating on waveguides is not possible due to the complex configuration and small sections of the waveguide tube with such length. Coating on waveguides with a midline length up to 300 mm is possible.

During the process of monitoring the internal channel of the waveguide, due to the complex configuration, there are blind spots that cannot be reached with an endoscope and controlled as necessary.

The use of flange connections allows to solve these problems by dividing the waveguide into several parts. In this case, there is an increase in the mass of the finished product by 30 %.

In the aerospace industry, severe restrictions on the weight of aircraft cause the use of various elements of the payload modules with optimal weight and size characteristics.

This also applies to the waveguide paths of the antenna-feeder devices of spacecraft. At the same time, the reliability of the elements must be high enough to ensure their functioning throughout the entire period of active existence, which is 12–15 years for modern communication spacecraft.



Schematic view of the assembly of waveguides using low-temperature solder

The low-temperature soldering technology of couplings with silver coating using PSrO 3 – 97 solder

has been developed. This solder provides all the necessary strength characteristics in the temperature range of  $\pm 150$  °C.

During the manufacturing process the waveguide is divided into several parts, the coating is performed and subsequent endoscopic quality control of the coating is carried out. Then, the waveguide is assembled by means of induction soldering with low-temperature solder. Assembly is carried out in two ways, shown in Figure.

These solutions allowed to keep the mass of the waveguide tract at an acceptable level. They allowed to apply a required quality silver coating (required coating thickness, adhesion strength, etc.) and use quality endoscopic control to check the internal channel of the waveguide for the absence of unacceptable defects.

© Zaitsev R. V., Skachkov I. A., Zlobin S. K., 2019



УДК 621.372.83.001.24

## ГИБКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СЕКЦИИ В СИСТЕМАХ ВОЛНОВОДНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Р. В. Зайцев, В. Ю. Гусев, В. В. Ананьев, И. А. Скачков, С. К. Злобин

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

*Рассмотрена проблема температурной развязки волноводного тракта и приборов бортовой аппаратуры КА.*

*Ключевые слова: пайка, волноводно-распределительные тракты, индукционный нагрев.*

## FLEXIBLE WAVEGUIDE SECTION IN THE WAVEGUIDE SYSTEMS AND DISTRIBUTION PATHS OF SPACECRAFT COMMUNICATION

R. V. Zaitsev, V. U. Gusev, V. V. Ananov, I. A. Skachkov, S. K. Zlobin

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Zaitsev@iss-reshetnev.ru

*The problem of thermal isolation of the waveguide tract and instruments onboard equipment SPACECRAFT.*

*Keywords: soldering, waveguide-distributive tracts, induction heating.*

В настоящее время на ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева совместно с СФУ и СибГУ им. М. Ф. Решетнева разработана и внедрена технология пайки алюминиевых волноводно-распределительных трактов космических аппаратов связи.

Волноводный тракт представляет собой трубу прямоугольного сечения из сплава на основе алюминия АД31Т1 с температурой плавления 630–670 °С. Материал, применяемый при пайке, – проволока Св. АК-12 с температурой пайки 580–600 °С. Для нагрева паяемой области деталей использован принцип индукционного нагрева как наиболее технологичного по сравнению с другими способами пайки (соляные ванны, печная пайка и др.).

Индукционный нагрев проводится следующим образом. Волновод помещается в индуктор, представляющий собой медную пластину с прямоугольным окном в ней, соответствующим сечению волноводной трубы (от 11×5,5 мм до 61×10 мм). В индукторе с помощью генератора наводятся мощные токи частотой 66 кГц, в результате чего вокруг индуктора возникает интенсивное электромагнитное излучение. Оно наводит в заготовке вихревое электрическое поле, которое в свою очередь наводит в объеме заготовки вторичные вихревые токи, которые разогревают волновод.

Одной из проблемных задач, требующей решения, является температурная развязка волноводного тракта и приборов бортовой аппаратуры КА. В целях предотвращения деформации волноводного тракта при расширении/сжатии вследствие температурного воздействия применяется гибкая секция, способная изменять длину без ухудшения РТХ волновода.

Гибкая секция представляет собой трубу прямоугольного сечения в виде гармошки. Гибкая секция изготавливается из материала БрБ2 с толщиной стенки 0,1 мм и покрытой серебром МЗ.Срб. Температура плавления БрБ2 955°С.

Проведена обработка пайки гибких секций двумя марками припоев:

- высокотемпературным припоем ПСр 40;
- низкотемпературным припоем ПСрО 3-97.

В процессе обработки столкнулись с дефектами паяного соединения, такими как неполное заполнение припоем первой гофры (охарактеризованном в дальнейшем как непропай) и вытекание припоя в канал гибкого волновода (наплывы), представленными на рис. 1. Данные дефекты не допустимы по КД, из-за увеличения потерь и КСВ (более 1,11)

Для решения данных задач проработана конструкция паяного соединения, внесены корректировки в конструкцию муфт и фланцев, а также ужесточены требования к гарантированному паяному зазору.

Еще одним из эффективных способов снижения количества дефектов паяного соединения и выполнения требований КД является предварительный расчет минимальной дозы припоя, объем которого является достаточным для формирования качественного паяного соединения. Проведен расчет припоя необходимого для формирования качественного паяного соединения.

Проведенные меры позволили получить качественное паяное соединение, представленное на рис. 2. На рис. 3 представлен паяный стык «ГВС – фланец (муфта)» в поперечном сечении.

Примененные технологические решения позволили получить качественное паяное соединение, соответствующее требованиям КД, а применение гибких

секций в конструкции волноводного тракта позволило снизить напряжения, создаваемые волноводным трактом, на приборы ПН и АФУ.

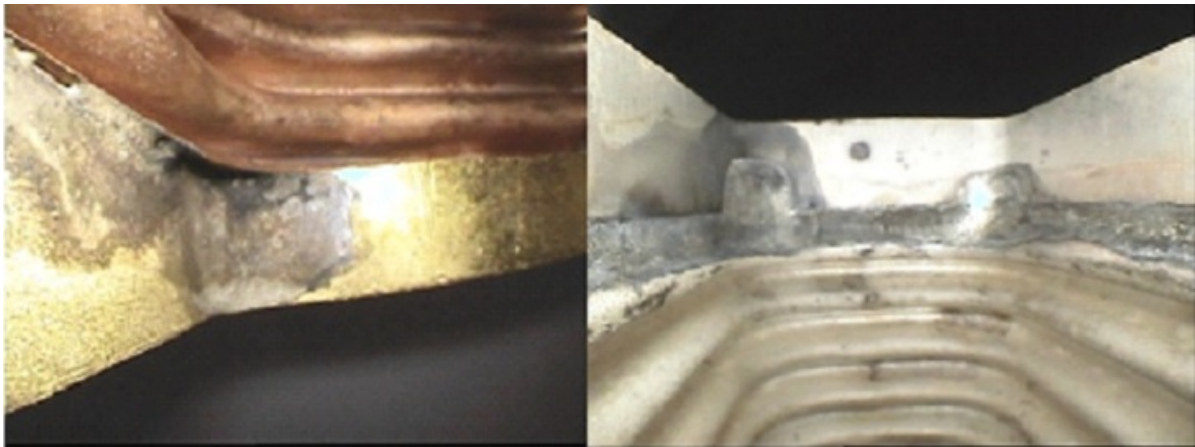


Рис. 1. Дефекты паяного соединения – непроай и наплывы

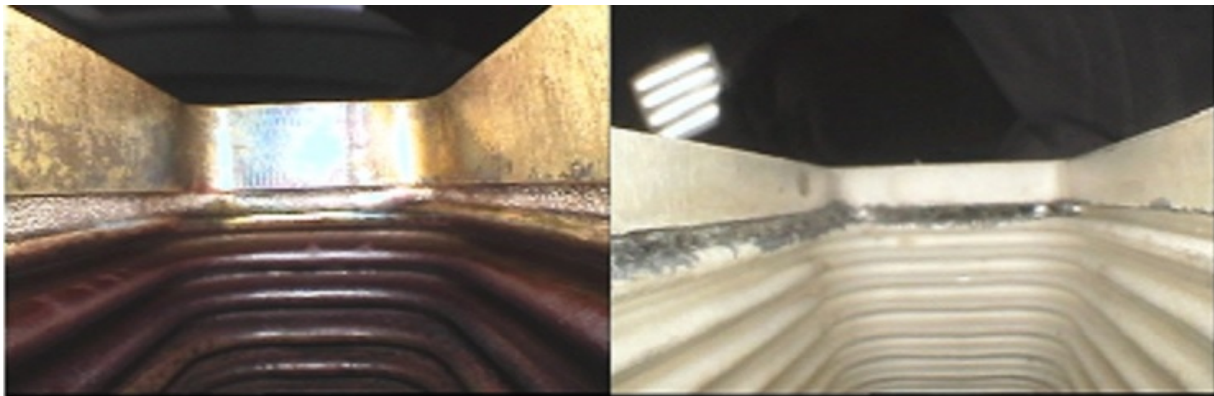


Рис. 2. Паяный стык «ГВС – фланец (муфта)», выполненный высокотемпературным (левый) и низкотемпературным припоем (правый)

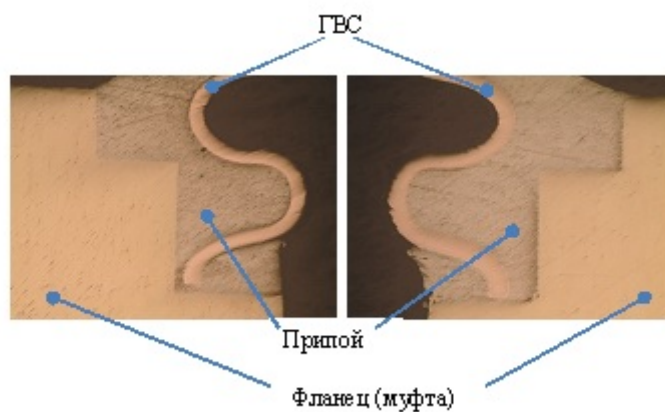


Рис. 3. Паяный стык «ГВС – фланец (муфта)» в поперечном сечении

© Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Ананьев В. В.,  
Скачков И. А., Злобин С. К., 2019

УДК 621.9.015

## ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЧЕРВЯЧНОЙ ПАРЫ С ИЗОГНУТЫМ ПРОФИЛЕМ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

Н. В. Захарова, Л. С. Малько, Л. С. Захаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 974152@mail.ru

*Рассматривается способ увеличения ресурса работы червячной пары путем нанесения антифрикционного покрытия, влияние шероховатости и толщины покрытия на долговечность.*

*Ключевые слова: антифрикционное покрытие, шероховатость, коэффициент трения, червячная пара.*

## INCREASING THE DURABILITY OF WORM GEAR WITH CURVED PROFILE BY APPLYING WEARPROOF COATING

N. V. Zakharova, L. S. Mal'ko, L. S. Zakharov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail:974152@mail.ru

*In this work we are considering a way to increase the work resource of worm gear by applying antifriction coating and roughness and a coating thickness influence on a durability.*

*Keywords: antifriction coating, roughness, friction coefficient, worm gear.*

Процесс изнашивания деталей в червячной паре зависит от многих факторов: материал трущихся деталей, характер трения и вид изнашивания, распределение давления по площадке (линии контакта), температуры и смазочного материала.

Применение антифрикционных покрытий для червячных редукторов с использованием известной полезной модели позволяет увеличить ресурс работы червячной передачи, состоящей из закаленного стального червяка и чугунного червячного колеса на 15–30 % по сравнению с аналогичными червячными передачами без конструктивных изменений, вследствие снижения коэффициента трения в контактной зоне [1].

Большое влияние на работоспособность глобоидной передачи оказывает шероховатость поверхности. С увеличением шероховатости обработки зубьев уменьшается их фактическая несущая поверхность. На вершинах микронеровностей возникают особенно высокие местные контактные напряжения, которые вызывают быстрый износ. Однако шероховатость является наиболее вероятной причиной резкого уменьшения нагрузочной способности. Коэффициенты контактных напряжений, соответствующие пределу контактной выносливости, уменьшаются с 0,9 до 0,15 кгс/мм<sup>2</sup>, если средняя высота элементов профиля  $R_c$  увеличивается с 1 до 7 мкм. Под средней величиной шероховатости понимается среднее арифметическое шероховатостей колеса и шестерни [1].

Исходя из функциональных свойств зацепления и надежности работы червячной передачи при гранич-

ном трении, на основании экспериментальных исследований, в соответствии с ГОСТ 2989–73, рекомендуется поверхность витков червяка выполнять с шероховатостью  $R_a = 0,32$  мкм [2]. Чрезмерно чистые и грубые поверхности отрицательно влияют на износостойкость. Грубо шероховатые поверхности контактируют по малым площадкам, что приводит к высоким фактическим давлениям, следовательно, к большому износу. Гладкие поверхности склонны к заеданию, они хуже удерживают смазку [3].

В ходе проведения эксперимента детали редуктора были обработаны антифрикционным покрытием Modengy 1001 (рис. 1), толщина покрытия составила 6 мкм, шероховатость  $R_a = 0,39$  мкм.

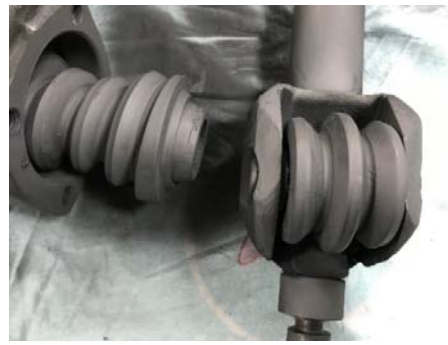
Проанализировав влияние шероховатости на толщину покрытия (рис. 2) и зависимость адгезии, слишком большая толщина обладает низкой адгезией с подложкой, можно сделать вывод, что оптимальная толщина слоя составляет 6–8 мкм.

После нанесения покрытия параметр шероховатости уменьшился в 4 раза с  $R_a = 1,6$  мкм до  $R_a = 0,39$  мкм, что характеризует уменьшение размеров микронеровностей и улучшения качества поверхностного слоя и снижения коэффициента трения до 0,03. Измерение адгезии покрытия определяем методом ASTM D-3359–09 (решетчатые надрезы поверхности) (рис. 3).

Процедура предполагает применение специальной ленты, которая чувствительна к давлению, с известным минимальным значением адгезионной прочности.



а



б

Рис. 1. Червячная пара с изогнутым профилем:  
а – до нанесения антифрикционного покрытия;  
б – после нанесения покрытия Modengy 1001

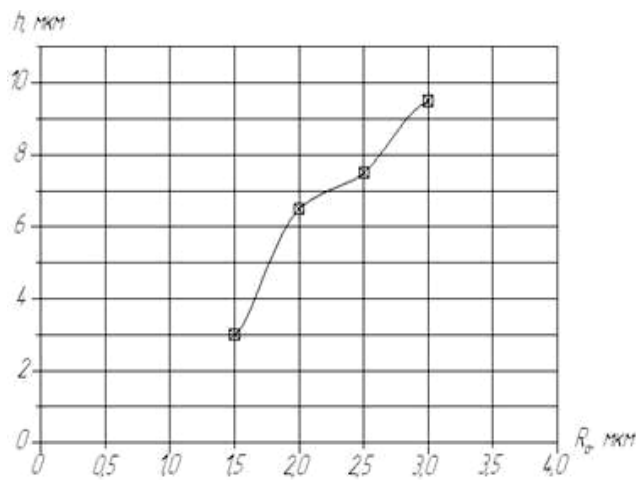


Рис. 2. Влияние шероховатости на толщину покрытия



Рис. 3. Измерение адгезии антифрикционного покрытия

Согласно методу ASTM D-3359-09, степень адгезии антифрикционного покрытия Modengy со стальным образцом составила 5В.

Экспериментальные исследования по определению параметров шероховатости проведены в соответ-

ствии с методикой выполнения измерений портативным измерителем шероховатости TR 220, толщина антифрикционного покрытия – толщиномер покрытий ТТ210, измерения адгезии покрытия – метод ASTM D-3359-09.

### Библиографические ссылки

1. Зайцев Г. Н., Любомудров С. А., Федюкин В. К. Нормирование точности геометрических параметров изделий : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГИЭУ, 2005. 400 с.
2. Захарова Н. В. Характеристика параметров шероховатости поверхности, установленных в международных стандартах ИСО // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. (10–14 ноября 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 458–460.
3. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) : учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МСХА, 2001. 616 с.

### References

1. Zaitsev G. N., Lyubomudrov S. A., Fedyukin V. K. Standartization of the product geometric options accuracy. Tutorial SPb. : St-Petersb. GIEU Publishing house, 2005. 400 p.
2. Zakharova N. V. [The characteristic of parameters of surface roughness in accordance with the requirements of ISO standards] // Reshetnevskie chteniya : Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. [Materials XV Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2015. P. 458–460 (In Russ.).
3. Garkunov D. N Tribotechnology (wearing and wearlessness) : Textbook. 4th edit., rewritten and augmented. M. : MSHA Publishing house, 2001. 616 p.

© Захарова Н. В., Малько Л. С., Захаров Л. С., 2019

### 3D-ПРИНТЕР С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМЕНОЙ РАБОЧЕЙ ГОЛОВКИ

М. М. Максимчук, А. О. Панаськов, Я. Е. Шумилина, М. Н. Серафимов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: maksimchuk1996@mail.ru

*Привод механизма смены рабочей головки для 3D-принтеров является актуальной проблемой в мехатронике. Данная научная статья посвящена изучению конструкции привода механизма смены рабочей головки с использованием расходного материала – ABS пластика.*

*Ключевые слова: экструдер, сопло, смена рабочей головки, конструкция механизма.*

### 3D PRINTER WITH AUTOMATIC CHANGE OF THE WORKING HEAD

M. M. Maksimchuk, A. O. Panaskov, Y. E. Shumilina, M. N. Serafimov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: maksimchuk1996@mail.ru

*The drive mechanism for changing the working the working head for 3D printers is an urgent problem in mechatronics; this scientific article is devoted to the study of the design of the drive mechanism for changing the working head using consumables – ABS plastic.*

*Keywords: extruder, nozzle, change of the working head, drive design.*

На 3D-принтерах часто изготавливаются сложные по форме изделия с разными геометрическими параметрами [1]. Процесс изготовления стандартным принтером (с одним соплом) занимает очень много времени. Привод механизма смены рабочей головки оснащен двумя соплами с разными внутренними диаметрами для того, чтобы изменить экструзию не изменяя параметры скорости перемещения и температуры экструдера [2].

Привод обеспечивает автоматическую замену рабочей сопла в зависимости от геометрических параметров изделия сокращая время, затрачиваемое на изготовление изделия.

Конструкция механизма заключается в повороте вала, на котором крепится экструдер с двумя соплами и нагревательным элементом, угол поворота контролируется концевыми датчиками и установленными упорами на экструдере [3], для сбережения концевых датчиков от ударов в случае неисправности программы. Поворот осуществляется шаговым двигателем постоянного тока, мощность которого рассчитана на срез ABS-пластика с учетным коэффициентом запаса. При срезании материала экструдер прижимается к корпусу пружиной, установленной в упоре на вал, это необходимо, чтобы обеспечить жесткое соединение в местах среза материала [4].

Механизм смены рабочей головки обеспечивает высокую скорость работы в изделиях, где используется разная толщина материала. Экструдер с одним соплом, внутренний диаметр которого 0,2 мм делает толщину в 0,6 мм за три цикла [5], а в механизме сме-

ны рабочей головки установлены 2 сопла с разными внутренними диаметрами, благодаря чему появляется возможность менять сопло на 0,6 мм и выполнять ту же работу, только за один цикл. Данный механизм располагается под наклоном в 45 градусов по отношению к рабочему столу 3D-принтера.

Механизм смены рабочей головки по своей конструкции позволяет установку на любой 3D-принтер с внесением основных крепежных отверстий, если они не имеются на 3D-принтере, к которому устанавливается данный механизм. Данный механизм повышает скорость работы 3D-принтера и позволяет не останавливать работу, чтобы произвести смену сопла.

#### Библиографические ссылки

1. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование : учеб. пособие. М. : МГТУ «СТАНКИН», 2004. 360 с.
2. Шейнблит А. Е. Курсовое проектирование деталей машин : учеб. пособие. Калининград : Янтар. сказ, 2006. 456 с.
3. Чернавский С. А., Боков К. Н., Чергин И. М. Курсовое проектирование деталей машин : учеб. пособие. М. : Альянс, 2005. 416 с.
4. Белянин П. Н. Промышленные роботы и их применение. М. : Машиностроение, 1983. 146 с.
5. Бурдаков С. Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. М. : Высшая школа, 1986. 78 с.

**References**

1. Egorov O. D., Poduraev Yu. V. Mechatronic modules. Calculation and design : textbook. Moscow, MSTU "STANKIN", 2004. 360 p.
2. Scheinblit A. E. Course design of machine parts: Textbook. Kaliningrad : Amber. Tale, 2006. 456 p.
3. Chernavsky S. A., Bokov K. N., Chergin I. M., Course design of machine parts: Tutorial. Moscow, Alliance, 2005. 416 p.
4. Belyanin P. N. Industrial robots and their application. Moscow, Engineering, 1983. 146 p.
5. Burdakov S. F., Dyachenko V. A., Timofeev A. N. Design of manipulators of industrial robots and robotic complexes. Moscow, Higher school, 1986. 78 p.

© Максимчук М. М., Панаськов А. О.,  
Шумилина Я. Е., Серафимов М. Н., 2019

## ОБРАЗОВАНИЕ ЗАЦЕПЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГЛОБОИДНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАРЫ С ВЫПУКЛО-ВОГНУТЫМИ ПРОФИЛЯМИ СОПРЯЖЕННЫХ ЗВЕНЬЕВ

Л. С. Малько, А. В. Сутягин, О. А. Суханова, Н. В. Захарова

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

*Представлены конструкторско-технологические решения по образованию зацепления контактных поверхностей глобоидно-цилиндрической пары с выпукло-вогнутыми эвольвентными профилями сопряженных звеньев, позволяющие улучшить эксплуатационные качества и повысить нагрузочную способность глобоидной червячной пары.*

*Ключевые слова: глобоидно-цилиндрическая пара, выпукло-вогнутые профили, тороидальная кривая, эвольвента, исходное производящее звено, принцип Т. Оливье, нагрузочная способность.*

## FORMATION GEAR CONTACT SURFACES OF GLOBOID CYLINDRICAL PAIRS WITH CONVEX-CONCAVE PROFILES OF PAIRED LINKS

L. S. Mal'ko, A. V. Sutyagin, O. A. Sukhanova, N. V. Zakharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: olkasukhanova@mail.ru

*There are engineering and design solutions for education engagement contact surfaces of globoid-cylindrical with a pair of convexo-concave involute profiles of the mating parts, which allow to improve operational characteristics and to increase the loading capacity of the globoid worm gear.*

*Keywords: cone-cylindrical pair, convex-concave profiles, toroidal curve, involute, bearing the original link, the principle T., Olivier, load capacity.*

Существенного улучшения эксплуатационных качеств и значительного повышения нагрузочной способности червячной передачи, как отмечено в работе [1], можно ожидать при изготовлении их с вогнутыми профилями витков червяка и выпуклыми профилями зубьев сопряженного колеса.

Этим передачам, как профильно-сопряженным, органически присуща плавность зацепления [2]. Однако, как отмечено в работе [3], промышленное применение глобоидных передач с выпукло-вогнутыми профилями сопряженных звеньев сдерживается по ряду причин, в том числе из-за сложности изготовления глобоидной червячной фрезы для нарезания колес к этим передачам.

Из изложенного следует, что задача изыскания конструкторско-технологических решений, позволяющих внедрить в производство изготовление этого вида прогрессивных глобоидных передач, является актуальной.

Одним из путей решения этой задачи может быть замена глобоидной передачи с червячным колесом и профилями сопряженных звеньев в форме тороидальной кривой на глобоидную передачу с цилиндрическим косозубым колесом. При этом профили

сопряженных звеньев должны быть очерчены по эвольвенте.

Технологические решения заключаются в следующем. Зубья сопряженного цилиндрического косозубого колеса нарезаются стандартным червячным инструментом цилиндрической формы. Нарезание витков глобоидного червяка выполняется дисковым многозубным инструментом на зубофрезерном станке по методу обкатки с профилированием по методу копирования.

Схема распределения элементарных движений при формообразовании винтовой поверхности глобоидного червяка представлена на рисунке.

Таким образом, сущность образования зацепления контактных поверхностей глобоидно-цилиндрической пары с выпукло-вогнутыми профилями сопряженных звеньев состоит в следующем: с помощью цилиндрической червячной фрезы методом обкатки нарезают цилиндрическое косозубое колесо; на базе этого колеса, взятого за основу как исходное производящее, изготавливают многозубый инструмент с эвольвентным профилем зубьев, с помощью которого нарезают методом обкатки с профилированием по методу копирования винтовую поверхность глобоидного червяка.



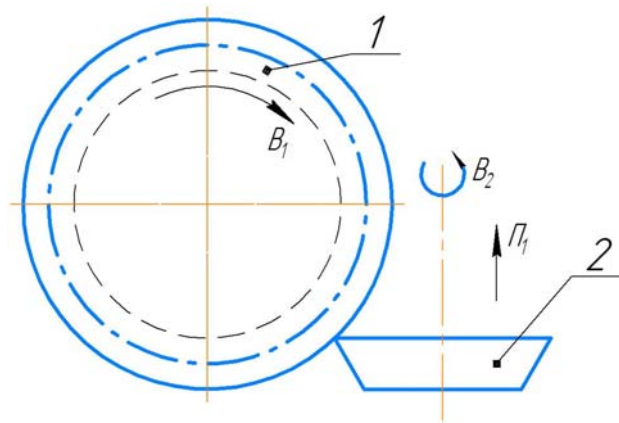


Схема распределения элементарных движений  
 1 – заготовка глобоидного червяка; 2 – многолезвийный инструмент;  $B_1$  – движение червяка в форме вращения;  
 $B_2$  – движением инструмента в форме вращения;  
 $\Pi_1$  – поступательное движение инструмента (вертикальная подача)

Нарезанные таким способом глобоидный червяк и цилиндрическое косозубое колесо в соответствии со вторым принципом Т. Оливье образуют сопряженную червячную пару.

#### Библиографические ссылки

1. Кривенко И. С. Новые типы червячных передач на судах: (Расчет и проектирование). Л. : Судостроение, 1967. 256 с.
2. Сандлер А. И., Лагутин С. А., Верховский А. В. Производство червячных передач / под общ. ред. С. А. Лагутина. М. : Машиностроение, 2008. 272 с.
3. Сандлер А. И., Лагутин С. А., Гудов Е. А. Теория и практика производства червячных передач общего вида / под общ. ред. С. А. Лагутина. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. 346 с.

#### References

1. Krivenko I. S. *Novye tipy chervyachnykh peredach na sudakh* [New types of worm gears on ships]. Leningrad : Sudostroenie, 1967. 256 p.
2. Sandler A. I., Lagutin S. A., Verkhovskiy A. V. *Proizvodstvo chervyachnykh peredach* [Manufacture of worm gears]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 272 p.
3. Sandler A. I. *Teoriya i praktika proizvodstva chervyachnykh peredach obshchego vida* [Theory and practice of general worm gear production]. Moscow : Vologda : Infra-Inzheneriya, 2016. 346 p.

© Малько Л. С., Сутягин А. В., Суханова О. А.,  
 Захарова Н. В., 2019

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ АВТОНОМНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

А. О. Панаськов, Я. Е. Шумилина, М. М. Максимчук

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
 E-mail: panaskov79@gmail.com

*Рассмотрен современный процессорный модуль, предназначенный для управления автономными роботами с системами технического зрения.*

*Ключевые слова: автономные системы, техническое зрение, процессорный модуль.*

## TECHNICAL VISION OF AUTONOMOUS MECHATRONIC SYSTEMS

А. О. Panas'kov, Y. E. Shumilina, M. M. Makismchuk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: panaskov79@gmail.com

*The modern processor module designed to control autonomous robots with vision systems.*

*Keywords: autonomous systems, technical vision, processor module.*

Техническое зрение – направление развития мехатронных и информационных систем [1], стремящихся к созданию машин и программных средств [2] которые смогут обнаруживать, отслеживать и производить классификацию объектов [3].

Для автономных мехатронных систем одной из основных задач технического зрения является определение различного рода препятствий и их характеристик, таких как габаритные размеры, скорость подвижного препятствия и его направление движения [4].

Существует несколько подходов для решения данной задачи: определение характеристик движение объекта с заранее известной геометрией и габаритами, выделение и отслеживание контрастных точек на предмете, поиск заранее установленных инфракрасных контрастных маркеров. Однако автономные мехатронные системы взаимодействуют не только с заранее известными предметами, и установка маркеров заранее тоже проблематична, так как рабочая среда заранее неизвестна. Тем самым остается только один способ – определение границ объекта. Для определения характерных черт обнаруженного объекта производится предварительная фильтрация изображения. Полученные точки и линии сохраняются в виде бинарного шаблона. Производится выборка точки и совмещенной с ней линии для совмещения с ней точки начала координат (рис. 1). Производится поворот изображения согласно новой координатной системе и остальные характеристические черты объекта получают измененные координаты, и производится измерение габаритных размеров объекта и повторная запись шаблона объекта.

После чего производится межкадровое сопоставление, для определения перемещения характеристических элементов за межкадровое время (рис. 2).

Полученные зависимости значений характеристик от времени обрабатываются с помощью фильтра Калмана [5].

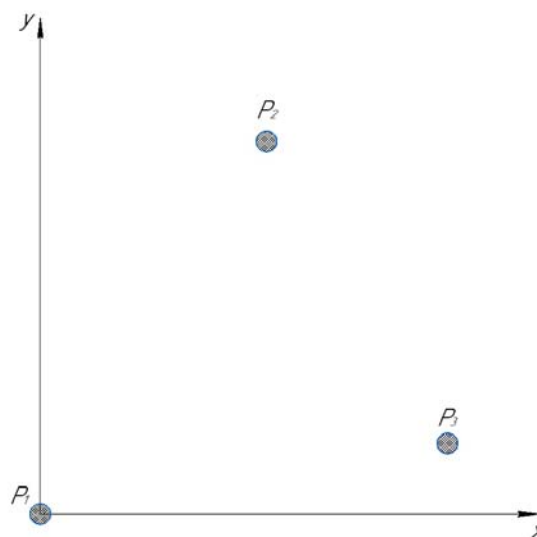


Рис. 1. Система координат, совмещенная с одной из характеристических точек объекта

В результате тестирования данной системы были выявлено, что система показывает точность измерения линейных размеров порядка 0,27 %, а точность измерения скорости движения объекта колеблется от 4 до 11 % в зависимости от освещенности сцены и вида объекта. Однако данный алгоритм подходит для работы с контрастными объектами, так как на монотонных объектах проблематично определить характеристические черты.

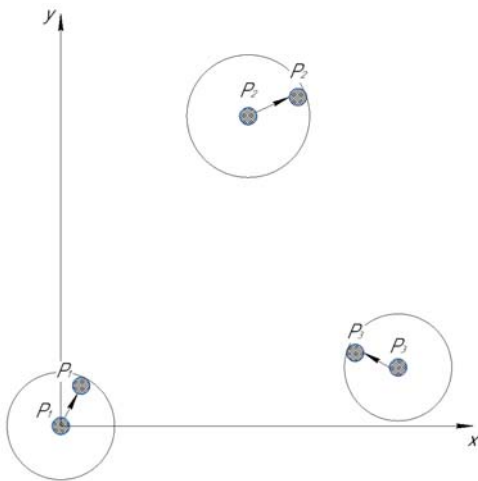


Рис. 2. Изменение положения объекта относительно предыдущего кадра

#### Библиографические ссылки

1. Кудрявцев П. С. Системы технического зрения с примерами решения задач в среде Matlab. М. : МАИ, 2015. 513 с.
2. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision / Ю. В. Визильтер и др. М. : ДМК Пресс, 2016. 464 с.
3. Reddy S., Chatterjee B. N. An FFT-based Technique for Translation, Rotation and Scale-invariant

Image Registration // IEEE Trans. on Image Proc. 1996. № 8. P. 1266–1271.

4. NVIDIA. Data Sheet for NVIDIA Jetson Nano System-on-Module. 2019. 1–41 p.

5. Алпатов Б. А. Оценивание параметров движущегося объекта в последовательности изменяющихся двумерных изображений // Автометрия. 1991. № 3. С. 21–24.

#### References

1. Kudryavtsev P. S. Sistemy tekhnicheskogo zreniya s primerami resheniya zadach v srede Matlab. Moscow, MAI, 2015. 513 p.

2. Obrabotka i analiz tsifrovyykh izobrazhenii s primerami na LabVIEW i IMAQ Vision / Yu. V. Vizil'ter et al. Moscow, DMK Press, 2016. 464 p.

3. Reddy S., Chatterjee B. N. An FFT-based Technique for Translation, Rotation and Scale-invariant Image Registration // IEEE Trans. on Image Proc. 1996. № 8. P. 1266–1271.

4. NVIDIA. Data Sheet for NVIDIA Jetson Nano System-on-Module. 2019. 1–41 p.

5. Alpatov B. A. Otsenivanie parametrov dvizhu-shchegosya ob'ekta v posledovatel'nosti izmenyayushchikhsya dvumernyykh izobrazhenii Avtometriya. 1991. № 3. P. 21–24.

© Панаськов А. О., Шумилина Я. Е., Максимчук М. М., 2019

УДК 629.7.01

## КОМПЛЕКТУЮЩИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ, АГРЕГАТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Ю. А. Семейных<sup>1\*</sup>, В. В. Двирный<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Политехнический институт Сибирского федерального университета  
Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии»  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова 12а

<sup>2</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: julya\_kash@mail.ru

*Рассмотрены особенности проведения наземных испытаний и экспериментальной отработки элементов узлов, агрегатов и систем космических аппаратов. Приведен пример системы обеспечения теплового режима.*

*Ключевые слова: космический аппарат, система обеспечения теплового режима, электрические испытания, испытательное оборудование, система терморегулирования.*

## COMPONENTS OF SYSTEMS OF HEATING OF THE HEAT MODE OF ELEMENTS OF NODES, UNITS OF SPACE VEHICLES WHILE GROUND TESTS

Iu. A. Semeinykh<sup>1\*</sup>, V. V. Dvirniy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Polytechnic Institute Siberian Federal University  
The Interinstitutional base Department “Applied Physics and Space Technologies”  
12a, Kirov Str., Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, 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: julya\_kash@mail.ru

*The features of conducting ground tests and experimental testing of elements of nodes, assemblies and systems of spacecraft are considered. An example of a thermal management system is given.*

*Keywords: spacecraft, system of thermal regime security, electrical tests, test equipment, thermal control system.*

Комплекующие обеспечивают построение системы обеспечения теплового режима (СОТР). Тепловой режим сложной информационной системы в экстремальных условиях космоса осуществляется излучением тепла от радиационных панелей, или сбросом вещества в космическое пространство. В то время как, при проведении наземных испытаний и экспериментальной отработки, тепло, выделяемое от оборудования, не полностью отводится естественным излучением и термоконвекцией, что может привести к поломке приборов и аппаратуры. Поэтому при проведении наземных испытаний космических аппаратов (КА), необходимо применение систем забора тепла и охлаждения воздуха, чтобы тепло, передаваемое на поверхности приборных панелей, отводилось с помощью созданной системы по охлаждению воздуха [1; 2].

Нами рассмотрены особенности производства технологического и испытательного оборудования экспериментальной базы для отработки космической техники, а также их составных частей и комплекующих системы обеспечения теплового режима для поддержания температур отдельных элементов узлов, агрегатов и систем КА в допустимых диапазонах на всех этапах электрических испытаний [3].

СОТР представляет собой воздушно-нагнетательный контур, в состав которого в зависимости от индивидуальных требований заказчика могут входить:

- холодильные машины;
- кондиционеры;
- напорные вентиляторы;
- теплообменники;
- датчики расхода;
- дифференцированные датчики давления;
- датчики температуры;
- соединительные воздуховоды;
- система управления;
- комплект ЗИП.

Подготовка воздуха в системе может осуществляться следующим образом – поступающий из окружающего пространства рабочего помещения воздух охлаждается в межтрубной полости теплообменника каждого контура за счет циркуляции хладагента в трубной полости [4]. Предложено к трубной полости теплообменника присоединить холодильную машину, обеспечивающую циркуляцию хладагента. При этом охлажденный воздух вентиляторами нагнетается в воздуховоды панелей КА, создавая тем самым коэф-

фициент теплоотдачи воздуха вдоль радиационных поверхностей панелей КА.

Анализ тепловых нагрузок современных КА позволил задаться следующими характеристиками СОТР:

– температура охлаждающего воздуха: от +16 до +24 °С;

– расход воздуха через ветвь воздухопроводов: от 1500 до 7200 м<sup>3</sup>/час;

– мощность потребления системы: от 10 до 70 кВт.

#### **Выводы:**

Предложенный состав комплектующих для СОТР обеспечит:

1) выбранные характеристики;

2) защиту от выхода из строя бортового оборудования КА;

3) электробезопасность обслуживающего персонала при проведении всех видов испытаний, взрывобезопасность и пожаростойкость.

#### **Библиографические ссылки**

1. Нариманов Г. С., Тихонравов М. К. Основы теории полета космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1972. 607 с.

2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2011. 487 с.

3. АО «НПО ПМ – МАЛОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО» [Электронный ресурс]. URL:

<http://www.npopm-mkb.ru/show/text/11> (дата обращения: 11.09.2019).

4. Космические вехи : сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Красноярск : ИП Суховольская Ю. П., 2009. 704 с.

#### **References**

1. Narimanov G. S., Tikhonravov M. K. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of spacecraft flight]. Moscow, Engineering, 1972. 607 p.

2. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Basics of the design of spacecraft information support]. Krasnoyarsk, SibGAU, 2011. 487 p.

3. JSC NPO PM – SMALL DESIGN BUREAU [Electronic resource]. URL: <http://www.npopm-mkb.ru/show/text/11> (accessed: 11.09.2019).

4. Kosmicheskiye vekhi : sb. nauch. tr., posvyashchenny 50-letiyu sozdaniya OAO «ISS» im. akademika M. F. Reshetnova» [Space milestones: Sat scientific tr., dedicated to the 50th anniversary of the creation of JSC «ISS» them. Academician M. F. Reshetnyova']. Krasnoyarsk: IP Sukholovskaya Yu. P., 2009. 704 p.

© Семейных Ю. А., Двирный В. В., 2019

УДК 621.372.83.001.24

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРОЧНОЙ ГОЛОВКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

И. А. Скачков, В. В. Ананьев, Р. В. Зайцев, В. Ю. Гусев, С. К. Злобин

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

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: dealig@rambler.ru

*Разработан кронштейн орбитальной сварочной головки неповоротных стыков тепловых труб.*

*Ключевые слова: орбитальная сварка, неповоротный стык, тепловые трубы, аддитивные технологии.*

## MODERNIZATION OF ORBITAL WELDING HEAD OF NON-TURN HEAT PIPE JOINTS

I. A. Skachkov, V. V. Ananov, R. V. Zaitsev, V. Y. Gusev, S. K. Zlobin

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

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: dealig@rambler.ru

*Developer bracket for orbital welding head of fixed joints of heat pipes.*

*Keywords: Orbital welding, fixed joint, heat pipes, additive technologies.*

Цель проводимых работ – разработка механического приспособления, обеспечивающего равномерный дуговой зазор при сварке неповоротных стыков тепловых труб.

Модернизация орбитальной сварочной головки неповоротных стыков тепловых труб проводилась в несколько этапов. Первый этап – сбор информации об эксплуатации. Второй этап – разработка прототипа в CAD-системе. Третий этап – изготовление прототи-

па с помощью аддитивных технологий. Четвертый этап – тестирование в реальных условиях (рис. 1–4).

В ходе работы было изготовлено несколько прототипов. Во время разработки были опасения связанные с прочностью конструкции и материала, поэтому закладывали максимально прочный кронштейн. Первый прототип вышел большим и тяжелым, даже с учетом неполного заполнения пластиком в ходе 3D-печати.

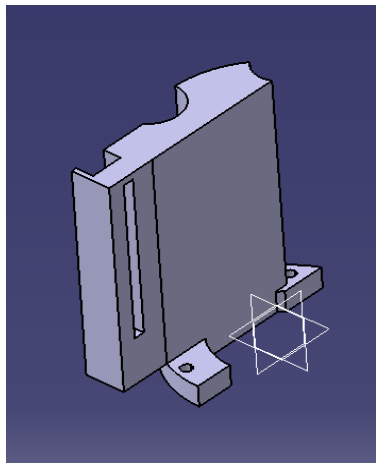


Рис. 1. Первый прототип кронштейна

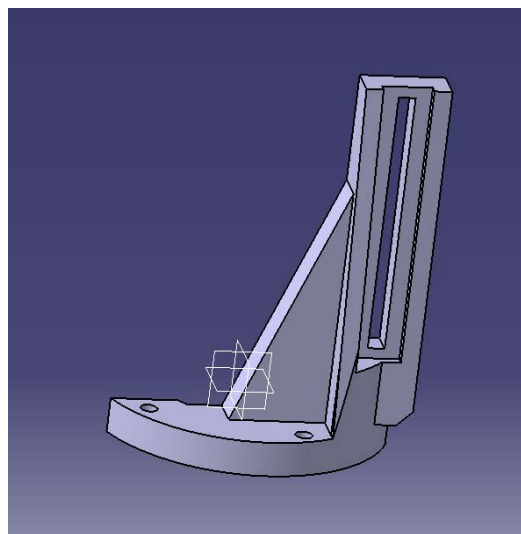


Рис. 2. Второй прототип кронштейна

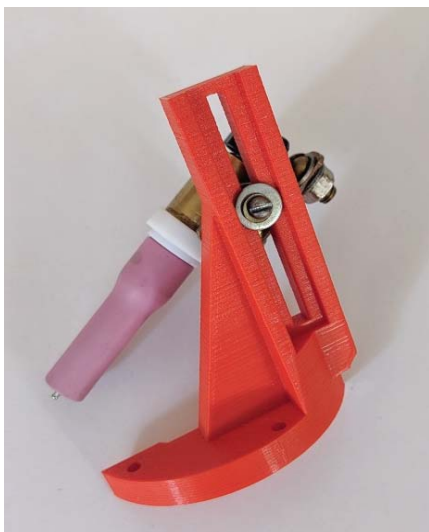


Рис. 3. Готовый кронштейн

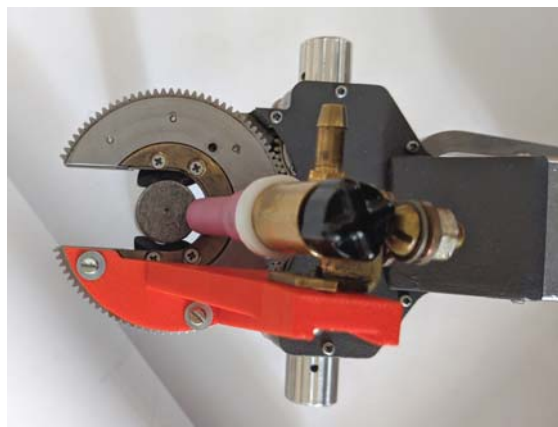


Рис. 4. Установленный кронштейн на орбитальную сварочную головку

Дальнейшая работа велась в сторону упрощения и уменьшения веса конструкции.

Кронштейн изготовлен с помощью аддитивных технологий. Материал кронштейна пластик ABS – при выборе материала в первую очередь выбирали подходящий температурный режим работы и технические характеристики 3D-принтера, по предварительным расчетам данный материал должен был работать продолжительное время без деформаций.

Испытание сварочной головки с установленным приспособлением проводилось при сварке неповоротных стыков тепловых труб. Произведена сварка партии образцов по типу «труба-заглушка» торцевым сварным швом на установке автоматической орбитальной сварки. Расчетные данные подтвердились практически, кронштейн не деформировался, не сломался.

Данная модернизация позволила получить стабильный дуговой зазор по всей длине сварочного шва.

Конструкцию кронштейна необходимо доработать, добавить регулировки положения сопла.

Физические свойства материала обеспечивают прочность конструкции и ее способность выдерживать долговременный нагрев.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 14771–76\*. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные, основные типы, конструктивные элементы и размеры. Введ. 01.07.1992. М. : Изд-во стандартов, 1992.
2. Оборудование трубосварочных баз : лекция. Ч. 3 [Электронный ресурс]. URL: [http://metallcheckiy-portal.ru/articles/svarka/svarka\\_trub/polevie\\_trubosvaroc\\_hnie\\_bazi/3](http://metallcheckiy-portal.ru/articles/svarka/svarka_trub/polevie_trubosvaroc_hnie_bazi/3) (дата обращения: 10.08.2019).

3. Акулов А. И. Технология и оборудование сварки плавлением : учебник / под ред. Т. И. Черешнева. М. : Машиностроение, 1977.

4. Генкин А. Э., Макаров Ю. И. Технологическое оборудование химических и нефтегазоперерабатывающих заводов : учебник / под. общ. ред. А. Л. Зильберберг. М. : Машиностроение, 1976.

5. Полисуд С. А. С. Справочник по орбитальной ВИГ-СВАРКЕ : дополненное издание 11/2014. Франция, Нант, 2014.

#### References

1. GOST 14771–76 \* Arc welding in shielding gas. Welded joints, basic types, structural elements and dimensions. Enter. 07/01/1992. Moscow, IPK Publishing House of Standards, 1992.
2. Equipment of pipe welding bases : Lecture. P. 3 [Electronic resource]. URL: [http://metallcheckiy-portal.ru/articles/svarka/svarka\\_trub/polevie\\_trubosvaroc\\_hnie\\_bazi/3](http://metallcheckiy-portal.ru/articles/svarka/svarka_trub/polevie_trubosvaroc_hnie_bazi/3) (access: 10.08.2019).
3. Akulov A. I. Technology and equipment for fusion welding : textbook / Edited by T. I. Chereshev. Moscow, Mechanical Engineering, 1977.
4. Genkin A. E., Makarov Yu. I. Technological equipment of chemical and oil and gas refineries : textbook / under. Society. Ed. A. L. Zilberberg. Moscow, Mechanical Engineering, 1976.
5. Polysud S. A. S. Handbook on the orbital TIG-WELC: supplemented edition 11/2014. (France), Nantes.

© Скачков И. А., Ананьев В. В., Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Злобин С. К., 2019

УДК 621.92

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНОДНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

В. И. Трифанов, Т. А. Пчелкина, И. В. Трифанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: tat0401@yandex.ru

*Рассмотрен метод анодно-абразивного полирования. Показаны технологические возможности метода при ААП труб малого диаметра.*

*Ключевые слова: анодно-абразивное полирование, абразивонесущий катод-инструмент, волновод, полирование.*

## TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF ANODE-ABRASIVE POLISHING OF PIPES OF A SMALL DIAMETER

V. I. Trifanov, T. A. Pchelkina, I. V. Trifanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tat0401@yandex.ru

*The method of anodic abrasive polishing is considered. Technological capabilities of the method are shown for AAP of small diameter pipes.*

*Keywords: anode-abrasive polishing, abrasive-bearing cathode-tool, waveguide, polishing.*

Для снижения шероховатости поверхности каналов тонкостенных труб малого диаметра  $\varnothing 8$  мм и менее может быть применен метод анодно-абразивного полирования (ААП) в пассивирующих электролитах [1; 2].

Использование пассивирующего электролита позволяет локализовать процесс анодного растворения преимущественно гребешков микронеровностей бегущим импульсным электрическим полем по обрабатываемой поверхности.

Удаление пассивирующей пленки с гребешков микронеровностей и активация их поверхности осуществляется абразивонесущими элементами катода-инструмента, совершающего продольные колебания. Снижение усилия контакта зерна абразива с микронеровностями за счет жидкостей и оксидной пленок, а также выравнивания вершин микронеровностей существенно могут снижать трение и силы микрорезания абразивными зернами. Однако воздействие импульсного электрического тока и прокачка электролита способны локализовать процесс сглаживания микронеровностей за счет избирательного анодного растворения микронеровностей в пределах допуска на размер с сохранением исходной точности (0,002–0,003 мм).

Для снижения шероховатости поверхности Ra от 0,6 мкм до 0,08 мкм требуется снять слой металла не более 0,03 мм при обработке ААП трубы малого сечения, изготовленной из сплава 32НКД.

ААП может проводиться с применением пассивирующего электролита  $\text{NaNO}_3$  и других при плотности тока 8–10 А/см<sup>2</sup> в течение 30 с, с продольными колебаниями абразивонесущего катода-инструмента час-

тотой  $f = 4$  Гц, с прокачкой электролита объемным расходом 8 г/с.

Выводы: предложен метод анодно-абразивного полирования труб малого сечения, который позволяет удалить дефектный слой и снизить шероховатость обрабатываемой поверхности без существенного механического и температурного воздействия на нее.

### Библиографические ссылки

1. Рубан И. В., Рубан В. М., Гаджиев З. А. Обработка деталей с заданной отражательной способностью // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 5.
2. Пат. 2588953 Российская Федерация МПК Н02Н 11/00 Способ анодно-абразивного полирования отверстий / Трифанов И. В., Малько Л. С., Трифанов В. И. № 20141499535 ; заявл. 8.12.2014 ; зарег. 7.07.2016, Бюл. № 19.

### References

1. Ruban I. V., Ruban V. M., Gadzhiev Z. A. Obrabotka detalej s zadannoj otrazhatel'noj sposobnost'yu // Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny. 2008. № 5.
2. Pat. 2588953 Rossijskaya Federaciya MPK N02N 11/00 Sposob anodno-abrazivnogo polirovaniya otverstij / Trifanov I. V., Mal'ko L. S., Trifanov V. I. № 20141499535 ; zayavl. 8.12.2014 ; zareg. 7.07.2016, Byul. № 19.

© Трифанов В. И., Пчелкина Т. А.,  
Трифанов И. В., 2019



## КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА ПИЛЕНИЯ ТРУБ

А. К. Тутушкин, А. М. Терин, Е. В. Раменская, Ю. А. Филиппов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
 E-mail: a.tutushckin@yandex.ru

*В настоящий момент данная отрасль металлообработки занимается созданием высокотехнологичного оборудования и его внедрением в промышленное производство отраслей промышленности.*

*Ключевые слова: кинематика, процесс пиления труб, станок, пила, оборудование.*

## THE KINEMATICS OF THE PROCESS OF CUTTING PIPES

А. К. Tutushkin, A. M. Therin, E. V. Ramenskaya, Y. A. Filippov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: a.tutushckin@yandex.ru

*At the moment this branch of Metalworking is engaged in creation of the hi-tech equipment and their introduction in industrial production of industries.*

*Keywords: kinematics, pipe sawing process, machine, saw, equipment.*

Уровень развития станкостроения определяет промышленный потенциал страны, экономическую неуязвимость, обороноспособность и независимость государства. Ключевая роль станкостроения в машиностроении определяется тем, что все машины и разнообразные изделия создают с помощью металлорежущих станков [1; 2].

Трубоотрезные станки применяют в заготовительном производстве для разрезки проката, прутков, труб, балок разных профилей [3]. Разрезку тонкостенных труб с толщиной стенки менее 16 мм из металла и сплава предпочтительней осуществлять дисковыми пилами с внутренними зубьями (рис. 1) на отрезных станках [4].

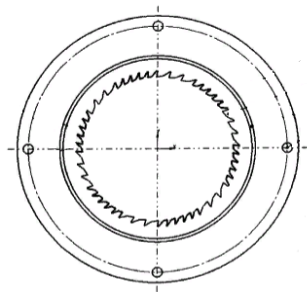


Рис. 1. Дисковая пила с внутренними зубьями

В зависимости от назначения станка и принятой технологии обработки необходимо обеспечить согласование относительных перемещений инструмента

и заготовки, которое осуществляется с помощью кинематических цепей. Совокупность этих цепей образует кинематическую схему станка [1].

Для конструирования трубоотрезного станка нового образца, производящим рез заготовки диском, имеющим внутренние зубья, разработана кинематическая схема (рис. 2), которая работает следующим образом:

– вращающий момент от двигателя 1 к редуктору 4 передается (по валу I и II) с помощью фрикционной муфты сцепления 2. В редукторе происходит понижение оборотов для оптимального режима резания. На выходном валу редуктора III установлен шкив 6, передающий при помощи ременной передачи 7 вращение на шпиндель станка 12 который приводит в движение режущий инструмент 11 [5, 6];

– во внутреннюю полость вращающегося механизма резания 10 и диска 11 вводится тонкостенная труба (на рисунке не указана), которая сначала базируется на призмах, а затем фиксируются во вращающихся пневматических тисках. Врезание пилы в заготовку производится после начала её вращения вокруг своей продольной оси вертикальным перемещением механизма резания на толщину стенки;

– отрезная часть технологической заготовки убирается манипулятором и складывается на транспортное место;

– затем цикл обработки повторяется, начиная от установки заготовки на мерную длину с последовательным включением механизмов резания и горизонтальной подачи заготовки.

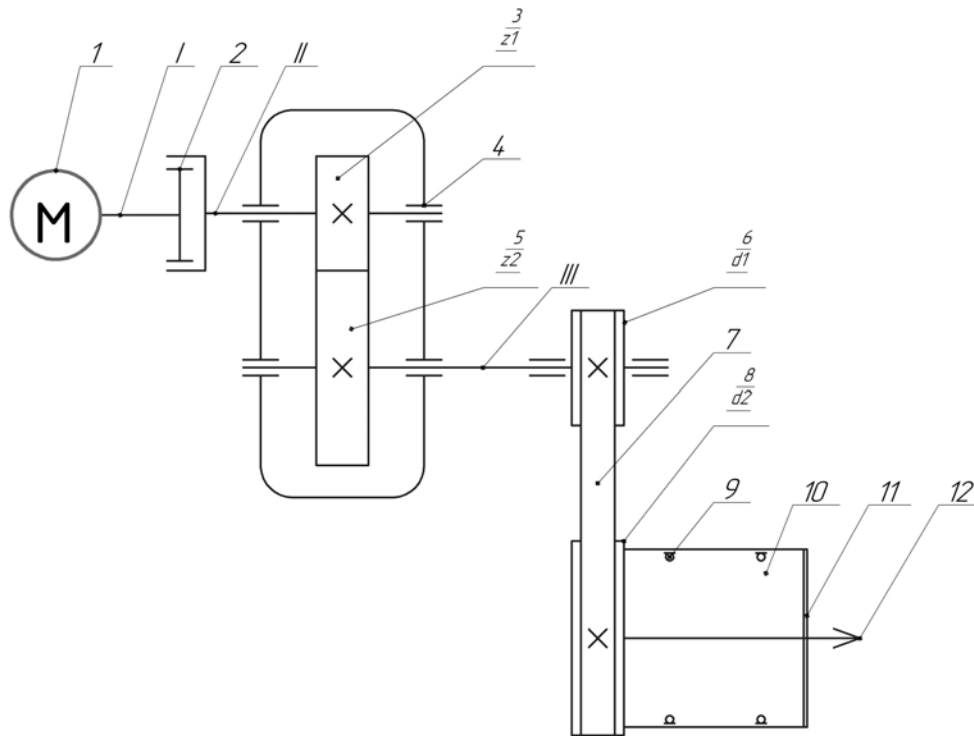


Рис. 2. Кинематическая схема механизма резания трубоотрезного станка:

- 1 – двигатель; 2 – муфта фрикционная; 3 – зубчатое колесо ведущее;  
 4 – подшипник радиальный; 5 – зубчатое колесо ведомое; 6 – шкив ведущий;  
 7 – ремень плоский; 8 – шкив ведомый; 9 – радиальный подшипник качения;  
 10 – механизм резания; 12 – режущий инструмент

Нарезка заготовок на трубоотрезном станке работающим диском с внутренними зубьями позволит получить высокое качество реза, перпендикулярность торца относительно оси заготовки, сократить время реза и увеличить производительность [4].

#### Библиографические ссылки

1. Чернянский П. Проектирование автоматизированных станков и комплексов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 451 с.
2. Попов С. А. Заточка и доводка режущего инструмента. М. : Высш. шк., 1986. 223 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, В. Б. Борисов и др. М. : Машиностроение, 1986. 657 с.
4. Пат. 189991 Российская Федерация, МПК В23Д 61/04, В23Д 45/08. Дисковая пила / Филиппов Ю. А., Раменская Е. В., Филиппов К. Ю.; заявл. 14.03.2019 ; опубл. 14.06.2019, Бюл. № 17.
5. Vereina L. Анализ металлорежущих станков с использованием структурных кинематических схем // Известия вузов. 2013. С 60–65. Сер. «Машиностроение».
6. Бирг Н. С., Громан И. А., Досчатов М. Б. Детали машин. Расчет и конструирование. М. : Машиностроение, 1968. 442 с.

#### References

1. Chernyanskiy P. *Proektirovanie avtomatizirovnykh stankov* [Designing automated machines and systems]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2014. 451 p.
2. Popov S. A. *Zatochka i dovodka rezushogo instrumenta* [Sharpening and fine-tuning of the cutting tool]. Moscow, High school, 1986. 223 p.
3. Handbook of technologist-machinist / A. G. Kosilov, R. K. Meshcheryakov, V. B. Borisov et al. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 657 p.
4. Filippov Yu. a., Ramensky V. E., Filippov K. Y. *Diskovaya pila* [Circular saw.] Patent RF, no 189991, 2019.
5. Vereina L. *Analiz metallorezhusheh Stankov s ispolzovaniem strukturnih kinematicheskikh shem* [Analysis of machine tools using structural kinematic schemes]. Proceedings Of Universities. Ser. “Mechanical engineering”, 2013. P. 60–65 (In Russ.).
6. Berg N. S., Roman I. A., Desjatov M. B. *Detali mashin. Rashet i konstruirovaniye* [Details of machines. Calculation and design]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 442 p.

© Тутушкин А. К., Терин А. М.,  
 Раменская Е. В., Филиппов Ю. А., 2019

УДК 62-523.2

## УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

А. А. Фадеев, И. Я. Шестаков, В. В. Кирбижекова, В. И. Шестаков, М. М. Яхонтов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: fadееv.77@mail.ru

*Представлена блок-схема и принципы управления линейным электродинамическим двигателем установки электрообработки для копировально-прошивочных операций при изготовлении штампов, пресс-форм и другой технологической оснастки в производстве авиационной и ракетно-космической техники.*

*Ключевые слова: линейный электродинамический двигатель, установка электрообработки, блок управления.*

## MANAGE THE INSTALLATION OF ELECTROBRAID METALS

A. A. Fadeev, I. Y. Chestakov, V. V. Kirbizhekova, V. I. Chestakov, M. M. Yakhontov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: fadееv.77@mail.ru

*The work presents the block diagram of unit and control principles of a linear electrodynamic engine installation electrobraid for copying and broaching operations in the manufacture of dies, molds and other tooling in the manufacturing of aviation and rocket-space technology.*

*Keywords: linear electrodynamic motor, electrical processing unit, control unit.*

**Введение.** В производстве деталей ракетно-космической техники применяется электрохимические и электрофизические методы. Приводы подавляющего большинства современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ, в том числе и электроэрозионных, строятся по традиционной схеме (перемещения рабочего органа осуществляется путём использования передачи винт-гайка). Недостатки указанных видов приводов достаточно известны и очевидны: большое количество промежуточных элементов, инерционность этих элементов, трение во множестве сопрягаемых деталей и др.

Одним из вариантов устранения этих недостатков является использование в качестве приводов подавляющего большинства станков линейного электродинамического двигателя, где совмещение рабочего органа стационарных машин и ротора электродвигателя позволяет уменьшить массу и размеры машины (привода), исключить из электропривода преобразователь движения (редуктора, передаточные механизмы), улучшить условия охлаждения [1].

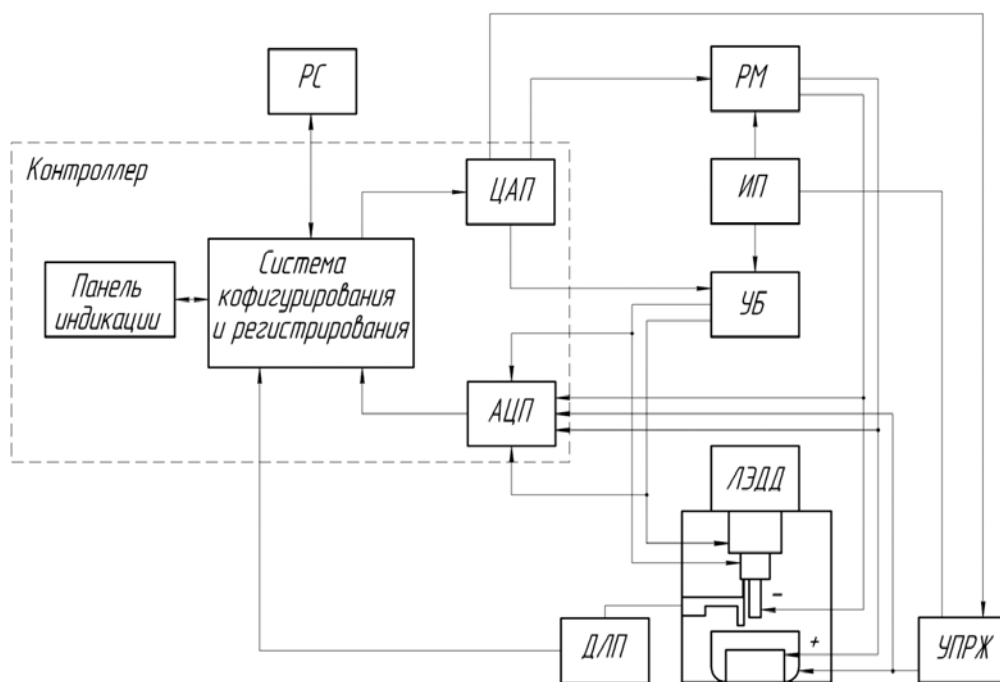
Сотрудниками СибГАУ была предложена конструкция привода подачи электрода-инструмента на основе линейного электродинамического привода [2; 3]. Линейный электродинамический привод наилучшим образом подходит для перемещения электрода – инструмента на каждый импульс технологического тока, следующих с частотой до 200 Гц [4–6]. В монографии [7] рассмотрены принципиальные схемы управления линейным электродинамическим двигателем. В настоящее время назрела необходимость

создать управление установкой электрообработки на современных электронных компонентах.

**Управления установкой.** Данная установка должна обеспечивать высокую точность обработки, поэтому необходимо, чтобы система управления технологическим процессом имела обратную связь для оценки входных и выходных данных, что позволит автоматизировать контроль и процесс обработки детали.

На рисунке представлена блок-схема управления установкой электрообработки. Сигнал, поступив на ЦАП, обрабатывается и подается на РМ и УБ. С РМ нужный технологический ток подается на систему электрод-инструмент электрод-заготовка и изменяется при необходимости согласно технологии обработки детали. УБ усиливает входящий ток, питает якорь и обмотку возбуждения и передает такие параметры как частота, скважность, форма импульса. Вводимые параметры будут регистрироваться системой АЦП, осуществляющей обратную связь и через контроллер поступают на панель индикации, где отображается работа элементов.

В данной установке предусмотрена система регистрации перемещения электрод-инструмента при помощи датчика линейных перемещений (с помощью него регистрируется и анализируется глубина обработки) Он же является одним из основных элементов обратной связи в системе: с его помощью система управления будет варьировать выходные параметры, которые необходимы для обработки заготовки на данном этапе.



Блок-схема управления установкой электрообработки:

РМ – распределитель мощности; ИП – источник питания; ДЛП – датчик линейных перемещений; УБ – усилительный блок; УПРЖ – устройство подачи рабочей жидкости; РМ – регулятор мощности; ЛЭДД – линейный электродинамический двигатель; ЦАП и АЦП – цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи; РС – персональный компьютер

Модульная конструкция, работа с естественным охлаждением, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы, удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения рациональных решений для построения систем автоматического управления в различных областях промышленного производства. Эффективному применению контроллеров способствует возможность использования нескольких типов центральных процессоров различной производительности, наличие широкой гаммы модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров. Система управления с оптическими датчиками перемещения и современной цифровой техникой позволит получить точность позиционирования электрода-инструмента в пределах несколько микрометров, что будет соответствовать мировому уровню.

#### Библиографические ссылки

1. Хромов Е. В. Линейный асинхронный двигатель в приводах стационарных машин с колебательным движением рабочих органов // Наука и современность – 2010 : сб. материалов III Междунар. научно-практ. конф. В 3 ч. Ч. 2 / под общ. ред. С. С. Чернова. Новосибирск : Издательство НГТУ, 2010. С. 222–225.
2. Пат. 2274525 РФ МПК В23Н 7/30 Электродинамический привод подачи инструмента / А. И. Стрюк, И. Я. Шестаков, А. А. Фадеев ; № 2004128716/02 ; заявлено 27.09.2004 ; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11. 5 с.
3. Стрюк А. И., Шестаков И. Я. Установка электрообработки с линейным электродинамическим двигателем // Вестник СибГАУ. 2006. № 3(10). С. 65–67.
4. Импульсная электрообработка вибрирующим электродом-инструментом / И. Я. Шестаков, А. И. Стрюк, А. В. Цуканов // Вестник СибГАУ. 2004. № 5. С. 253–258.
5. Конструирование исследовательской установки для электрообработки на базе электродинамического привода / А. А. Фадеев, И. Я. Шестаков, О. Е. Артюкова // Вестник СибГАУ. 2010. № 4(30). С. 133–137.
6. Артюкова О. Е., Шестаков И. Я., Ремизов И. А. Электроконтактнoхимическая обработка вибрирующим электродом-инструментом // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти акад. М. Ф. Решетнева / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. Ч. 1. С. 364–366 .
7. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Фадеев А. А. Линейные электродинамические двигатели. Конструирование. Практическое использование : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 156 с.

### References

1. Hromov E. V. [Linear asynchronous motor in drives of stationary machines with oscillatory motion of working bodies]. *Nauka i sovremennost' – 2010 : sbornik materialov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. T2*, [Science and modernity-2010: proceedings of the III International scientific and practical conference. In 3 parts. Part 2]. Novosibirsk, 2010. P. 222–225 (In Russ.)
2. Stryuk A. I., Shestakov I. Y., Fadeev A. A. *Elektrodinamicheskij privod podachi instrumenta* [Electrodynamic actuator tool feed]. Patent RF, № 2274525. 2006.
3. Stryuk A. I., Shestakov I. Y. [Setting electrobraid with a linear electrodynamic engine] // *Vestnik SibGAU*. 2006. № 3. P. 65–67 (In Russ.)
4. Shestakov I. Y., Stryuk A. I., Cukanov A. V. [Pulse elektroosnastka vibrating electrode-tool] // *Vestnik SibGAU*. 2004. № 5. P. 253–258 (In Russ.)
5. Fadeev A. A., Shestakov I. Y., Artyukova O. E. [Construction of research facilities for electrobraid on the basis of electrodynamic actuator] // *Vestnik SibGAU*. 2010. № 4(30). P. 133–137 (In Russ.)
6. Artyukova O. E., Shestakov I. Y., Remizov I. A. [Electroconductivities machining with vibrating electrode-tool] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XIV Mezhdunarod. nauch. konf.* [Materials XIV Intern. scientific. Conf. «Reshetnev readings»]. Krasnoyarsk, 2010. P. 364–366 (In Russ.)
7. Chestakov I. Y., Struk A. I., Fadeev A. A. *Lineynye elektrodinamicheskie dvigately. Konstruirovaniye. Prakticheskoye ispolzovaniye* (Linear electrodynamic motors. Design. Practical use) / SibGAU. Krasnoyarsk, 2011. 148 p.

© Фадеев А. А., Шестаков И. Я.,  
Кирбижекова В. В., Шестаков В. И.,  
Яхонтов М. М., 2019

УДК 621.6.09:534.01

**ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДАЧИ НА ЗУБ ПРИ РЕЗКЕ ТРУБЫ**

К. Ю. Филиппов, И. Н. Спицын, Е. В. Раменская\*, Ю. А. Филиппов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lena@kraslan.ru

*Изложены результаты производственных инструментальных измерений динамического процесса раскроя трубы из алюминиевого сплава АМгб и определено рациональное значение подачи на зуб. Результаты исследования используют в учебном процессе подготовки магистрантов и бакалавров.*

*Ключевые слова: резание, дисковая пила, подача на зуб, измерение, моделирование, акустика.*

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TOOTH FEED DURING PIPE CUTTING**

K. Yu. Filippov, I. N. Spicyn, E. V. Ramenskaya\*, Yu. A. Filippov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lena@kraslan.ru

*The results of production instrumental measurements of dynamic process of pipe cutting from aluminium alloy AMg6 are presented and rational value of supply to tooth is determined. The results of the study are used in the educational process of master's and bachelor's degrees.*

*Keywords: cutting, disk saw, tooth feed, measurement, simulation, acoustics.*

На основе разработанных теоретических разделов работы с целью прогнозирования режимов резания стальных тонкостенных труб круглого сечения выполнены заводские измерения на территории механического цеха ООО «ЕнисейПромАвтоматика». Работы по измерению проводились на механическом участке на линии резки труб и проката из деформируемых алюминиевых сплавов [1].

Базовым станком для резки трубы круглого сечения из сплава алюминия АМгб с параметрами  $D \times s$  – 110×5 мм служил станок модели Univer 55 FS pertici (рис. 1) с мощностью привода 1,85 кВт и частотой вращения  $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$ . При резке труб использовали дисковую пилу Globus 550×4,4×30 с числом зубьев  $z = 160$  (рис. 2). Пневматический наклон головки с пилой станка настраивался на угол 90°. Дисковая пила с гидropневматической фронтальной подачей имела отрицательный передний угол зуба 7° и использовалась при скорости резания 80,5 м/с [2].

По форме ГОСТ 15.309–98 [3] составлен акт № 1/4 Типовые испытания дисковой пилы, при резании алюминиевой трубы на станке Univer 55 FS pertici.

В результате проведенных производственных испытаний с учетом работ [4; 5] оценена эффективность и целесообразность изменений скорости подачи на зуб без уменьшения качества обработки. В процессе раскроя трубы из алюминиевого сплава АМгб определено рациональное значение подачи на зуб – 0,067 мм при скорости резания 80,5 м/с. При резке измеренное виброускорение составляло не более 11–12 м/с<sup>2</sup>, виброскорость 3–5 мм/с, акустическая эмиссия  $L_a = 96,3 \text{ дБА}$ .



Рис. 1. Отрезной станок модели Univer 55FS

Рис. 2. Пила дисковая Globus 550×4,4×30,  $z = 160$

В результате работы предложено использовать для резки труб: из сплавов алюминия подачу на зуб  $f_z = 0,01 \div 0,07$  мм/зуб; из конструкционной стали –  $f_z = 0,004 \div 0,008$  мм/зуб; из легированной стали 30ХГСА  $f_z = 0,002 \div 0,004$  мм/зуб при скорости резания  $V_c = 7 \div 30$  м/мин.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 18475–82. Трубы холоднодеформированные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Введ. 1984-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1993. 26 с.

2. Филиппов К. Ю., Пушкарев А. Ю., Раменская Е. В. Критическая частота вращения дисковых пил [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. в 3 т. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2017. Т. 1. С. 45–46. URL: <https://apak.sibsau.ru/page/materials> (дата обращения 04.06.2019).

3. ГОСТ 15.309–98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения. Введ. 2000-01-01. М. : Стандартинформ, 2010. 16 с.

4. Раменская Е. В., Филиппов Ю. А. Управление вибрацией средств технологического оснащения : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 172 с.

5. Филиппов К. Ю., Янковская Н. Ф., Раменская Е. В. Ортогональная устойчивость дисковых пил // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч. конф. (9–12 ноября 2016, г. Красноярск): в 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 581–583.

#### References

1. GOST 18475–1982. *Truby holodnodeformirovannye iz alyuminiya i alyuminiyevyh splavov. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 18475-82. Cold-deformed pipes made of aluminium and aluminium alloys. Specification]. Intr. 1984-01-01. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1993. 26 p.

2. Filippov K. Yu., Pushkarev A. Yu., Ramenskaya E. V. [Critical rotational speed of circular saws] [Electronic resource]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavтики : Materialy XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk. 2017. Vol. 1. P. 45–46* (In Russ.). URL: <https://apak.sibsau.ru/page/materials> (accessed: 04.06.2019).

3. GOST 15.309–1998. *Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. Ispytaniya i priemka vypuskaemoj produkcii. Osnovnye polozheniya*. [State Standard 15.309-1998. Product development and production system. Testing and acceptance of products. Basic provisions]. Intr. 2000-01-01. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 16 p.

4. Ramenskaya E. V., Filippov Yu. A. *Upravlenie vibraciej sredstv tekhnologicheskogo osnashcheniya: monogr.* [Vibration control of technological equipment: monogra] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 172 p.

5. Filippov K. Ju., Jankovskaja N. F., Ramenskaja E. V. [Orthogonal stability of circular saws] *Reshetnevskie chteniya: materialy XX Jubilejnoj mezhdunar. nauch. konf. (9–12 nojabrja 2016, g. Krasnoyarsk). V 2 ch. Ch. 1 / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2016. P. 581–583* (In Russ.).

© Филиппов К. Ю., Спицын И. Н.,  
Раменская Е. В., Филиппов Ю. А., 2019

## ЗАТОЧКА ДИСКОВЫХ ПИЛ С ПЛАНАРНЫМИ РЕЖУЩИМИ ЗУБЬЯМИ

К. Ю. Филиппов, Е. В. Раменская\*, В. В. Раменский, Ю. А. Филиппов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lena@kraslan.ru

*Изложены результаты первичных исследований технологических требований к заточиванию дисковых пил с внутренними режущими зубьями, в зависимости от геометрической точности проектируемых мини-шпинделей новой конструкции.*

*Ключевые слова: заточивание, дисковые пилы, технология, моделирование.*

## SHARPENING OF DISK SAWS WITH PLANAR CUTTING TEETH

K. Yu. Filippov, E. V. Ramenskaya\*, V. V. Ramenskiy, Yu. A. Filippov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lena@kraslan.ru

*The results of initial investigations of technological requirements for sharpening of disk saws with internal cutting teeth are presented, depending on geometric accuracy of designed mini spindles of new design.*

*Keywords: sharpening, disk saws, technology, modeling.*

В машиностроении намечены значительные изменения в производстве рабочих машин. Приняты правительственные решения в части совершенствования материальной базы не на основе модернизации устаревших конструкций, а на основе новых научно-технических результатов исследований вузами. Такому требованию отвечает разработанная пила с внутренними режущими зубьями патент RU №189991 [1], позволяющая многократно снизить путь резания. Это достигается новой кинематикой резания труб диаметром  $D < 250$  мм, заключающейся в использовании вращения режущего инструмента и заготовки при врезной ортогональной подаче дисковой пилы.

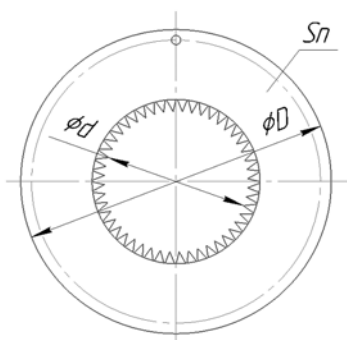


Рис. 1. Дисковая пила с внутренними зубьями

Как и любой режущий инструмент пила подвергается заточке для восстановления режущей способности. Заточивание дисковых пил с внутренними зубьями (рис. 1) требует создания заточных станков с уни-

версальным шпинделем с габаритами 50–60 мм, несущим абразивный круг. Интерес представляет конструкция механизма резания на принципах возвратно-поступательных движениях резцов, используемых при нарезке конических зубьев зубчатых колес на станках типа 526Е. Это направление требует дополнительных исследований кинематики заточки дисковых пил.

Технические требования к мини шпинделю должны быть не ниже действующих нормативов [3; 4] на допуски радиального, осевого биений и радиальной жесткости для станков повышенного –  $H$ , прецизионного –  $P$  и суперпрецизионного –  $SP$  классов точности.

Проведено моделирование связей между характеристиками и параметрами точности [5] и получены графические модели и аналитические зависимости с достоверностью аппроксимации не ниже 0,997:

– шероховатости зубьев пилы от радиального биения шпинделя заточного станка (рис. 2)

$$Ra = 12,039 x^{-0,795},$$

$$TCR = 2,289 x^{-2,429},$$

где  $x$  – условное обозначение класса точности станка;

– шероховатости зубьев пилы от осевого биения шпинделя (рис. 3)

$$Ra = 0,897 x^{-0,231},$$

$$TCA = 7,937 x^{-0,634},$$

– шероховатости зубьев пилы от радиальной жесткости шпинделя

$$Ra = 0,222 x^{1,093},$$

$$j = 2,380 x^{-2,471}.$$

Проработка технологии заточки дисковых пил выявила ряд проблемных вопросов, которые могут быть



актуальными на будущие сроки прогнозирования. В проектных решениях по освоению новой техники в области заточивания дисковых пил параметры радиальной жесткости следует ужесточать более 20 %, а осевой жесткости до 35 % по сравнению с существующими конструкциями.

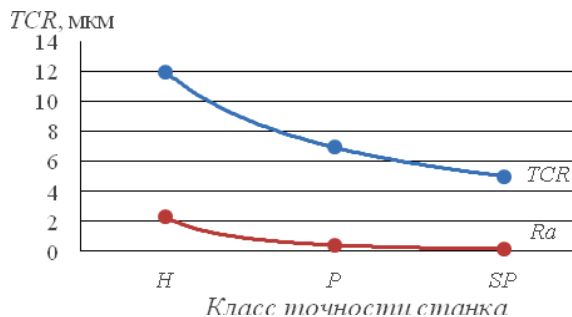


Рис. 2. Модель связи шероховатости и радиального биения шпинделя

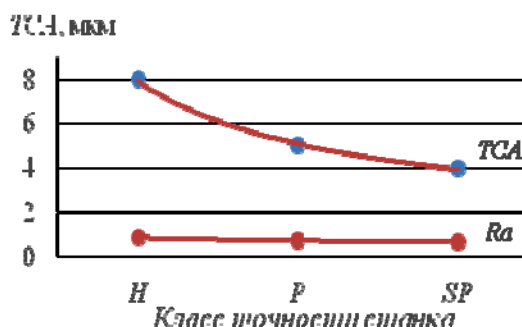


Рис. 3. Модель связи шероховатости и осевого биения шпинделя

Графические зависимости, представленные впервые, позволяют анализировать технологическую точность процесса заточки дисковых пил.

#### Библиографические ссылки

1. Патент 189991 Российская Федерация, МПК В23D 61/04, В23D 45/08. Дисковая пила / Филиппов Ю. А., Раменская Е. В., Филиппов К. Ю. ; заявл. 14.03.2019 ; опубл. 14.06.2019, Бюл. № 17.

пов Ю. А., Раменская Е. В., Филиппов К. Ю. ; заявл. 14.03.2019 ; опубл. 14.06.2019, Бюл. № 17.

2. Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачникова. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.

3. ГОСТ 8.051–81. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. Введ. 1988–03–01. М. : Изд-во стандартов, 1987. 6 с.

4. ГОСТ 20404–88. Станки для заточки круглых пил. Нормы точности и жесткости. Введ. 26.07.1988–07–26. М. : Изд-во стандартов 1988. 12 с.

5. Раменская Е. В., Филиппов Ю. А. Управление вибрацией средств технологического оснащения : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 172 с.

#### References

1. Filippov Yu. A., Ramenskaya E. V., Filippov K. Yu. *Diskovaya pila* [Disk saw] Patent RF, No. 189991, 2019.

2. Tabenkin A. N., Tarasov S. B., Stepanov S. N. *Sherokhovatost, volnistost, profil. Mezhdunarodnyy opyt* [Roughness, undulation, profile. International experience] / Pod red. kand. tekhn. nauk N. A. Tabachnikovoy. SPb. : Izd-vo Politekh. un-ta Publ., 2007. 136 p.

3. *GOST 8.051–1981. Pogreshnosti dopuskaemye pri izmerenii lineynykh razmerov do 500 mm* [State Standard GOST 8.051-1981. Errors allowed when measuring linear dimensions up to 500 mm]. Intr. 1988–03–01. Moscow, Standartinform Publ., 1987. 6 p.

4. *GOST 20404–1988. Stanki dlya zatochki kruglykh pil. Normy tochnosti i zhestkosti* [State Standard 20404-1988 Round saw sharpening machines. Norms of accuracy and rigidity]. Intr. 1988–07–26. Moscow, Standartinform Publ., 1988. 12 p.

5. Ramenskaya E. V., Filippov Yu. A. *Upravlenie vibraciej sredstv tekhnologicheskogo osnashcheniya: monogr.* [Vibration control of technological equipment: monogra] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011, 172 p.

© Филиппов К. Ю., Раменская Е. В., Раменский В. В., Филиппов Ю. А., 2019

УДК 621.6.09:534.01

**ТЕКСТУРА ПОВЕРХНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ КА**

К. Ю. Филиппов, В. В. Раменский, А. В. Пронин, Н. Ф. Янковская\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: nat-yan.1@yandex.ru

*Изложены результаты первичных исследований развития текстуры поверхностей фрезерования в производстве ракетно-космической техники, получены новые графические и аналитические зависимости, раскрывающие характер процесса изменения допусков на размеры с включенной долей шероховатости; раскрытие проблемы точности и шероховатости позволяет оптимизировать показатели прецизионности.*

*Ключевые слова: текстура поверхности, шероховатость, моделирование, фрезерование.*

**SURFACE TEXTURE MILLING PARTS KA**

K. Yu. Filippov, V. V. Ramenskiy, A. V. Pronin, N. F. Yankovskaya\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: nat-yan.1@yandex.ru

*The results of primary studies of the texture development of milling surfaces in the production of rocket and space technology are presented, new graphical and analytical dependences are obtained, revealing the nature of the process of changing the tolerances on the dimensions with an included share of roughness; this disclosure of the problem of accuracy and roughness allows to optimize the precision.*

*Keywords: surface texture, roughness, modeling, milling.*

Руководствуясь решениями правительства РФ по национальным проектам развития машиностроения в области оборонно-промышленного комплекса, а также станкостроительной и инструментальной промышленности исследования в области повышения качества продукции машиностроения заметно усилились работы по созданию новой техники.

Текстура как особенность строения поверхности деталей характеризуется параметрами: профиль, волнистость, шероховатость [1]. В двух последних регламентными величинами являются шаг и высота неровности.

Качество изготовленных деталей оценивается тремя параметрами: допусками на размер, допусками формы и расположения поверхностей и шероховатостью. В мире насчитывается более ста параметров шероховатости, что существенно отличается от российских, нормированных по ГОСТ 2789. Ужесточение численных значений допусков со времен начала индустриализации страны до наших дней превысили в 5 раз [1; 2]. Это привело к увеличению в общем допуске доли допуска, приходящегося на шероховатость. В последние четыре десятилетия средняя доля

допуска, приходящаяся на шероховатость, увеличилась более трех раз и составила порядка 36 % [3; 4].

Вследствие этого, в частности, ужесточились допуски цилиндричности, круглости и прямолинейности.

Характер изменения анализировался по коэффициенту дивергенции, который вычислялся по зависимости:

$$K_{Ra} = [A / (1 + \Delta Rz)] \Delta Rz, \quad (1)$$

где  $A$  – численный ряд изменения допуска на размер с исходным значением 50 мкм;  $\Delta Rz$  – изменение допуска в относительных единицах, %.

В результате моделирования получены следующие зависимости:

– изменение допуска на исходный размер с коэффициентом достоверности аппроксимации  $R^2=0,982$ :

$$y = 2E + 131x^{-39,44}; \quad (2)$$

– изменение доли шероховатости в % с коэффициентом достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,988$ :

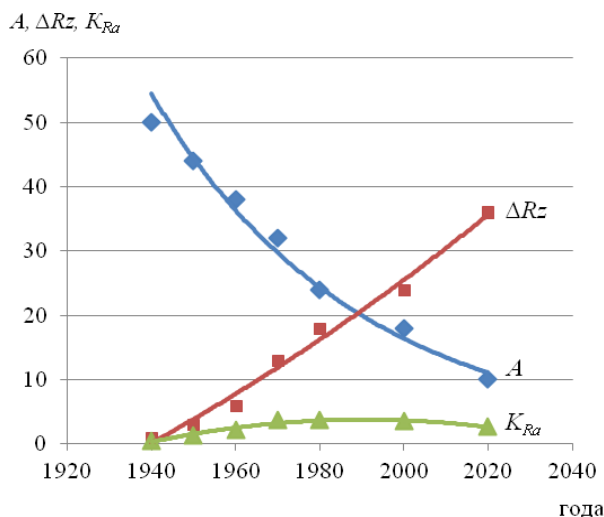
$$y = 0,001x^2 - 3,6859x + 3226,1; \quad (3)$$

– коэффициент дивергенции с коэффициентом достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,947$ :

$$y = -0,0014x^2 + 5,406x - 5376,9; \quad (4)$$

**Изменение доли шероховатости в допуске на размер**

$X_{(год)}$	1940	1950	1960	1970	1980	2000	2020
Изменение допуска на размер, $A$	50	44	38	32	24	18	10
Изменение доли $\Delta Rz$ , %	0,01	0,03	0,06	0,13	0,18	0,24	0,36
Коэффициент дивергенции $K_{Ra}$	0,49	1,28	2,15	3,68	3,66	3,48	2,64



Графическая модель изменения доли шероховатости в допуске на размер

Анализируя полученные графические и аналитические зависимости (см. рисунок), наиболее рациональным соотношением ужесточения допуска и составляющей шероховатости можно считать девятидесятые годы прошлого века, когда наблюдался характерный скачок прецизионности в массовом производстве, в частности в автомобилестроении, двигателестроении и ракетостроении [5; 6].

Таким образом, эволюционное развитие текстуры поверхностей фрезерования наиболее ярко проявилось в производстве космических аппаратов длительного пользования. Кроме того, имеющиеся наработки составили основу стандарта по точности и прецизионности и отразилось на изданных и внедренных шести стандартах серии ГОСТ Р ИСО 5725.1–2002.

Исходный размер взят для 8 качества с диапазоном размеров от 80–120 с допустимой погрешностью измерений 12 мкм по ГОСТ 8.051–81.

Результаты исследования используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

#### Библиографические ссылки

1. Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / под ред. канд. тех. наук Н. А. Табачниковой. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.
2. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 232 с.
3. Уотс Д., Старки Ж. Оптимизация амплитуд колебаний элементов конструкции вязким демпфированием // Современное машиностроение. Труды амери-

канского общества инженеров-механиков, ASME. 1990. № 12. С. 89–95.

4. ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений, введен 23.4.2002. М. : Стандартиздат. 24 с.

5. Раменская Е. В., Филиппов Ю. А. Управление вибрацией средств технологического оснащения : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 172 с.

#### References

1. Tabenkin A. N., Tarasov S. B., Stepanov S. N. Sherohovatosť, volnistosť, profil'. Mezhdunarodnyj opyt / pod red. kand. teh. nauk N. A. Tabachnikovoj. SPb. : Izd-vo Politehn. un-ta, 2007. 136 p.
2. Dunin-Barkovskij I. V., Kartashova A. N. Izmerenija i analiz sherohovatosťi, volnistosti i nekruglosti poverhnosti. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 232 p.
3. Uots D., Starki Zh. Optimizacija amplitud kolebanij jelementov konstrukcii vjazkim dempfirovanijem // Sovremennoe mashinostroenie. Trudy amerikanskogo obshhestva inzhenerov-mehaničkov, ASME. 1990. № 12. P. 89–95.
4. GOST R ISO 5725-1–2002. Točnost' (pravil'nosť i precizionnosť) metodov i rezul'tatov izmerenij, vveden 23.4.2002. Moscow, Standartizdat. 24 p.
5. Ramenskaja E. V., Filippov Ju. A. Upravlenie vibraciej sredstv tehnologičeskogo osnashhenija : monografija / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 172 p.

© Филиппов К. Ю., Раменский В. В., Пронин А. В., Янковская Н. Ф., 2019

## ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЗАКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ ЛИГАТУР НА ЭФФЕКТ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СПЛАВА АК12

А. И. Черепанов<sup>1</sup>, Т. В. Бермешев<sup>1</sup>, В. П. Жереб<sup>1,2</sup>, В. Ю. Таскин<sup>1</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. газ. «Красноярский рабочий», 31

*Исследовано модифицирующее воздействие на микроструктуру сплава АК12 модификатора, полученного из этого же сплава методом закалки из жидкого состояния. Модифицирующий эффект быстрокристаллизованной лигатуры в количестве 2 % от металлозавалки сохраняется в течение 3 часов, что позволяет производить разливку металла в течение этого времени без потери свойств отливок.*

*Ключевые слова: модифицирование, быстрокристаллизованная лигатура, сплав АК12, отливка.*

## FAST CRYSTALLIZED LIGATURES AS MASTER ALLOYS FOR AK12 ALLOY

A. I. Cherepanov<sup>1</sup>, T. V. Bermeshev<sup>1</sup>, V. P. Zhereb<sup>1,2</sup>, V. Yu. Taskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*The modifying effect on the microstructure of an AK12 alloy of a modifier obtained from the same alloy by liquid quenching was studied. The modifying effect of the rapidly crystallized ligature in the amount of 2 % of the metal filling remains for 3 hours, which allows casting of metal during this time without loss of casting properties.*

*Keywords: modification, quick-crystallized ligature, AK12 alloy, casting.*

В современных условиях литейные сплавы в России в общем объеме производства алюминиевых сплавов составляют порядка 20 % [1]. В связи с этим перед производителями остро стоит задача выпуска конкурентоспособной продукции при минимальных затратах и обеспечении высоких механических и эксплуатационных свойств. Это затрагивает и такую область машиностроения, как производство силовых агрегатов аэрокосмической техники. Литые изделия в основном изготавливают из модифицированных силуминов, обладающих высокой жидкотекучестью, удовлетворительной коррозионной стойкостью, малым удельным весом [2].

В настоящей работе исследовали модифицирующее воздействие на сплав АК12 модификатора, полученного из этого же сплава методом закалки из жидкого состояния (эффект «самомодифицирования»). Модифицирующую быстрокристаллизованную лигатуру готовили следующим способом. Плавка У1: после расплавления алюминия и его нагрева до температуры 900–950 °С вводили кремний, после расплавления которого и снижения температуры до 720–730 °С сплав разливали в кокиль на «гагаринские» образцы и химический анализ. Быстрокристаллизованную лигатур получали литьем готового расплава на наклоненный равнополочный уголок размером 50×50. Для модифицирующих лигатур отбирали пластинки сплава толщиной до 0,3–0,5 мм.

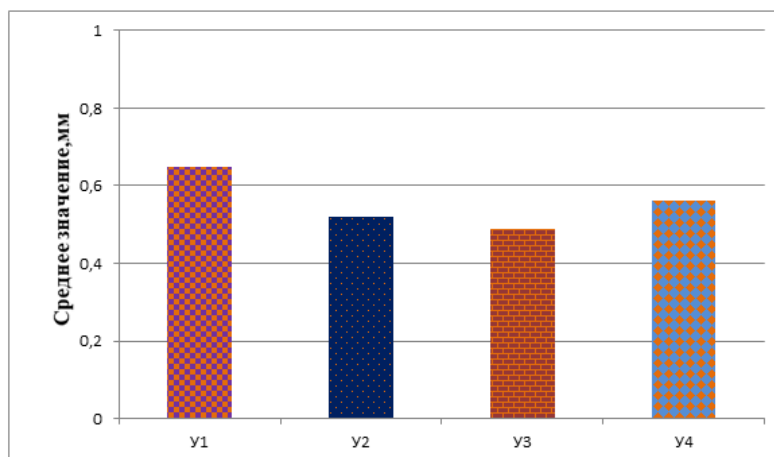
Плавку У2 готовили так же, как и У1, но дополнительно вводили модифицирующие лигатуры *AlSr* и

*AlTiB* при температуре 730–740 °С. Полученные быстрокристаллизованные лигатуры У1 и У2 использовали для модифицирования плавков У4 и У3 соответственно. Эффект модифицирования проверялся в плавках У3 и У4 выдержкой готового сплава в течение 3 часов. На отдельно отлитых образцах определяли химический состав, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение, твердость, исследовали микроструктуру [3].

В таблице приведены механические свойства плавков У1–У4. Наименьшие показатели соответствуют плавке У1, полученной без модифицирования. Наибольшие показатели соответствуют плавке У2, модифицированной лигатурами *Al-Sr* и *Al-Ti-B*. Показатели плавков У3 и У4 занимают промежуточное положение, как модифицированные быстро кристаллизованными лигатурами У1 и У2. Причем лигатура У1 готовилась без модифицирования, а У2 с модифицированием лигатурами *Al-Sr* и *Al-Ti-B*.

Сравнивая плавки У3 и У4 видно, что плавка У3 имеет более высокие показатели, чем У4. Видимо это обусловлено модифицированием лигатурой У2, содержащей *Sr*, *Ti*, *B*, а лигатура У1 готовилась без модифицирования.

В плавке У3 заметно влияние применения модифицирующей лигатуры. Плавка У4, приготовленная без остаточных компонентов модифицирующих лигатур *Al-Sr* и *Al-Ti-B*, имеющая пониженные показатели по сравнению с плавкой У3, также соответствует требованиям ГОСТ Р 50511–93.



Среднее значение размера зерна макроструктур сплава АК12 в зависимости от технологии плавки

Зависимость механических свойств плавки У3, У4 от времени выдержки расплава в течение 3-х часов находятся в пределах: предел прочности от 195 до 205 МПа; относительное удлинение от 5,8 до 6,5 %.

#### Механические свойства

№ плавки	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
У1	110	185	5,0	54
У2	123	206	6,8	57
У3	118	205	6,5	56
У4	115	195	5,8	56

Результаты показывают стабильность механических свойств в течение времени, т. е. быстрозакристаллизованные лигатуры могут применяться для модифицирования и обеспечивают эффект модифицирования в течение 3-х часов. По полученным на оптическом микроскопе изображениям структур сплавов измерили средний размер зерна каждого образца [4]. Полученные результаты представлены на рисунке.

Исследованиями установлено, что среднее значение величины зерен дендритов колеблется в пределах от 0,49 до 0,65 мм. Наименьшая величина зерна достигнута в плавках У3 и У4 за счет воздействия быстро охлажденных лигатур. Анализ полученных результатов показывает, что при вводе в расплав АК12 быстроохлажденного сплава такого же химического состава, он выполняет функцию модификатора, так как измельчает его структуру  $x$ . Этому способствует внесение в расплав вместе с шихтой инородных частиц – потенциальных центров кристаллизации  $\alpha_{Al}$ . Кроме того, нельзя исключать образования в алюминиевом расплаве новых дисперсных частиц, в том числе и оксида алюминия, а также формирования в расплаве локальных зон растворения модификатора, в которых содержатся мелкие кристаллы  $\alpha_{Al}$ , являющиеся готовыми центрами кристаллизации  $\alpha_{Al}$  из базового расплава.

#### Библиографические ссылки

1. Аналитический бюллетень. Metallurgy: тенденции и прогнозы. ООО РА «РИА Рейтинг» 2013. № 12.

2. Филиппова И. А. Исследования и разработка модификаторов, закаленных из жидкого состояния, и технологии модифицирования доэвтектических силуминов с целью получения высококачественных отливок транспортного машиностроения : дис. ... канд. техн. наук. М. : МИСиС, 2011. 112 с.

3. Белов Н. А., Савченко С. В., Хван А. В. Фазовый состав и структура силуминов. М. : МИСИС, 2007. 283 с.

4. Количественная оценка структурных составляющих модифицированного сплава АК12 / Н. В. Окладникова, А. В. Кречетова, Е. А. Косарева и др. // Молодёжь и наука : сб. материалов VI Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных [Электронный ресурс]. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section16.html>, свободный.

#### References

1. Analytical bulletin. Metallurgy: trends and forecasts. LLC RA RIA Rating 2013. No. 12.

2. Filippova I. A. Research and development of modifiers hardened from a liquid state, and technology for modifying pre-eutectic silumins in order to obtain high-quality castings of transport engineering : dis. ... cand. tech. sciences. Moscow, MISiS. 2011.112 s.

3. Belov N. A., Savchenko S. V., Khvan A. V. Phase composition and structure of silumins. Moscow, MISiS. 2007. 283 s.

4. Quantitative assessment of the structural components of a modified AK12 alloy / N. V. Okladnikova, A. V. Krechetova, E. A. Kosareva et al. // Youth and Science : Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists [Electronic resource]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section16.html>, free.

© Черепанов А. И., Бермешев Т. В., Жереб В. П., Таскин В. Ю., 2019

## УПЛОТНЕНИЕ ВЫХОДНОГО ВАЛА ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНОГО МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ

Я. Е. Шумилина, А. О. Панаськов, М. М. Максимчук

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

*Рассмотрены различные виды уплотнений и произведен их подбор для подводного мехатронного модуля.*

*Ключевые слова: уплотнения, подводный модуль, мехатроника, двигатели.*

## SEALING OF THE OUTPUT SHAFT OF THE MOTORS OF THE UNDERWATER MECHATRONIC MODULE

Y. E. Shumilina, A. O. Panas'kov, M. M. Maksimchuk

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: yana.shum@gmail.com

*Various types of seals are considered and selected for the underwater mechatronic module.*

*Keywords: seals, underwater module, mechatronics, movers.*

Необходимо подобрать материал уплотнения выходных узлов подводного робота, учитывая его глубину погружения и ограничение в размерах. Существует несколько типов уплотнений, например, контактная система уплотнений – достигает герметизацию путем соприкосновения подвижной и неподвижной частей уплотнений.

Манжетное уплотнение – подвижное, основной элемент – манжета, которая может иметь металлическое армирование. Комбинированное уплотнение – использование нескольких типов уплотнения, например манжетного и лабиринтного [1–3]. Рассмотрена схема, представленная на рис. 1, с использованием манжетного уплотнения по ГОСТ 9833–73.

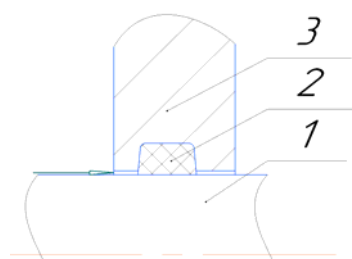


Рис. 1. Эскиз установки уплотнения:  
 1 – выходной вал; 2 – резиновое кольцо;  
 3 – корпус

В щель между корпусом и валом на уплотнение действует давление 1,47 МПа, на внутреннюю грань уплотнения действует крутящий момент 1,7 Н·м, необходимо провести расчеты перемещений. При помощи SolidWorks Simulation проводим исследование,

установив соответствующие ограничения на модель и приложив силы. Результат статического анализа по перемещению приведен на рис. 2.

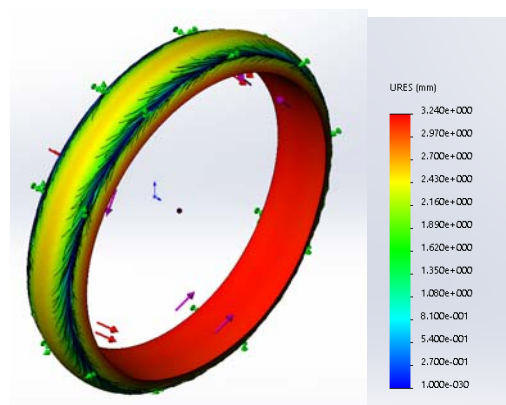


Рис. 2. Результат статического анализа на перемещение резинового уплотнения

Внутренняя грань уплотнения переместилась на 3,240 мм, следовательно необходимо рассмотреть более надежный материал уплотнения. Было предложено использовать для уплотнения нейлоновое кольцо такой же формы [4; 5] На рис. 3 представлен результат статического анализа перемещения нейлонового кольца.

Максимальное перемещение оказалось на внутренней грани кольца и составило всего  $1,8 \cdot 10^{-2}$  мм.

Был сделан вывод о нецелесообразности использования уплотнительных колец из резины в подводном роботе для погружения на 150 метров, рекомендованы к использованию нейлоновые кольца.

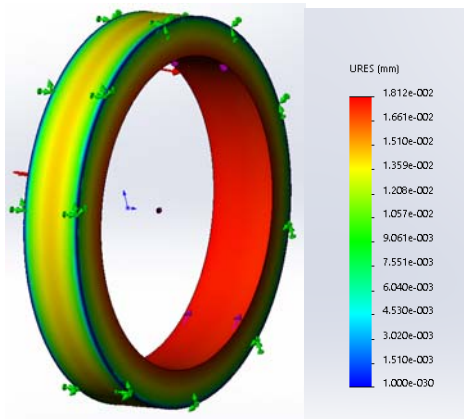


Рис. 3. Результат статического анализа на перемещение нейлонового кольца

#### Библиографические ссылки

1. Electronic textbook “Mechanical shaft seals for pumps” [Электронный ресурс]. URL: [https://us.grundfos.com/content/dam/Global%20Site/Industries%20%26%20solutions/mining/ShaftSeal\\_samlet.pdf](https://us.grundfos.com/content/dam/Global%20Site/Industries%20%26%20solutions/mining/ShaftSeal_samlet.pdf) (дата обращения: 01.09.2019).
2. Du R. Robot fish // Springer. 2015. P. 145–151.

3. Голубев А. И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. М. : Машиностроение, 1974. 212 с.
4. Antonelli G. Underwater Robots // Springer, 2018. P. 192.
5. Horve L. Shaft seals for dynamic applications // CRC Press, 1996. P. 205.

#### References

1. Electronic textbook “Mechanical shaft seals for pumps” [Elektronnyi resurs]. URL: [https://us.grundfos.com/content/dam/Global%20Site/Industries%20%26%20solutions/mining/ShaftSeal\\_samlet.pdf](https://us.grundfos.com/content/dam/Global%20Site/Industries%20%26%20solutions/mining/ShaftSeal_samlet.pdf) (access: 01.09.2019).
2. Du R. Robot fish // Springer. 2015. P. 145–151.
3. Golubev A. I. Tortsovye uplotneniya vrashchayushchikhsya valov. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 212 p.
4. Antonelli G. Underwater Robots // Springer. 2018. P. 192.
5. Horve L. Shaft seals for dynamic applications // CRC Press. 1996. P. 205.

© Шумилина Я. Е., Панаськов А. О.,  
Максимчук М. М., 2019

## INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TIME BEFORE PRESSING ON ITEM THICKNESS

A. V. Shcherbakova, A. A. Savenkov, E. V. Rublevskaja, A. V. Sutyagin, O. V. Maslova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: slak1373@mail.ru

*The article analyzes the influence of temperature and time before pressing (between two operations) on thickness of item made of polymer composite material and a gap between parts of machining attachments. Given analysis allows to determine rational temperature and time before pressing for such items as fittings made of prepreg. The research also contributes to reduction of dimensional defect.*

*Keywords: temperature, polymer composite material, fitting, dimensional defect, machining attachments' gap, item thickness.*

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ДО ПРЕССОВАНИЯ НА ТОЛЩИНУ ИЗДЕЛИЯ

А. В. Щербакова, А. А. Савенков, Е. В. Рублевская, А. В. Сутягин, О. В. Маслова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: slak1373@mail.ru

*Проведен анализ влияния температуры и времени до прессования (между двумя операциями) на толщину изделия из полимерного композиционного материала и зазор между частями оснастки. Проведенный анализ позволяет определить рациональную температуру и время до прессования изделия типа «фитинг» из препрега и минимизировать размерный брак.*

*Ключевые слова: температура, полимерный композиционный материал, фитинг, размерный брак, зазор технологической оснастки, толщина изделия.*

Fittings are manufactured at the Resource Center of Collective Use «Space vehicles and systems» (RCCU “SVS”). Fitting is an element of the corporate design of a large-sized reflector [1]. Its production requires quality control. The gap between parts of machining attachments is generally controlled since it has influence on the item thickness.

The thickness of the finished fitting should be  $2,8^{+0,5}$  mm and the gap between parts of machining attachments should not exceed 0,3 mm. If the item thickness is not respected, there will be a risk of delamination and insufficient compaction of item which will affect its the mechanical properties [2].

Such method of nondestructive inspection as visual and measuring testing is used during fitting production [3]. The fitting thickness was measured in several places with the dial manual thickness gauge TR 25–100 within accuracy of 0,1 mm. As a result, average item thickness was determined and it equals to 3 mm. The data was recorded in the measurement log for each fitting [4]. The measurement log is shown in 1 and tab. 1. The gap between parts of machining attachments was measured with the help of measuring gauge-feelers 0,05–1,00 mm. Average value of gap is 0,25 mm. Measurement data was recorded in checklists presented in fig. 2. Influence of

temperature and time before pressing on item thickness will be analyzed on the basis of data from the checklists.

During fittings' geometrical parameter checkout various types of defects were identified such as dimensional defects – deviation from nominal dimensions exceeding specific tolerance (5/40), foreign inclusions (1/40), starved spots (1/40), air inclusions (1/40), nontought cracks intersecting layers of the CM with depth (2/40) [5].

1) 2 items were pressed after holding for 60 minutes at a temperature of 125 °C. The gap between parts of machining attachments was within 0,3 mm and thickness of the finished item was 3,1 mm;

2) 4 items were pressed after holding for 40 minutes at a temperature of 140 °C. The gap between parts of machining attachments was within 0,28 mm and thickness of the finished item was 3,2 mm;

3) 4 items were pressed after holding for 50 minutes at a temperature of 140 °C. The gap between parts of machining attachments was within 0,35 mm and thickness of the finished item was 3,5 mm;

4) 30 items were pressed after holding for 30 minutes at a temperature of 160 °C. The gap between parts of machining attachments was within 0,25 mm and thickness of the finished item was 2,9 mm.



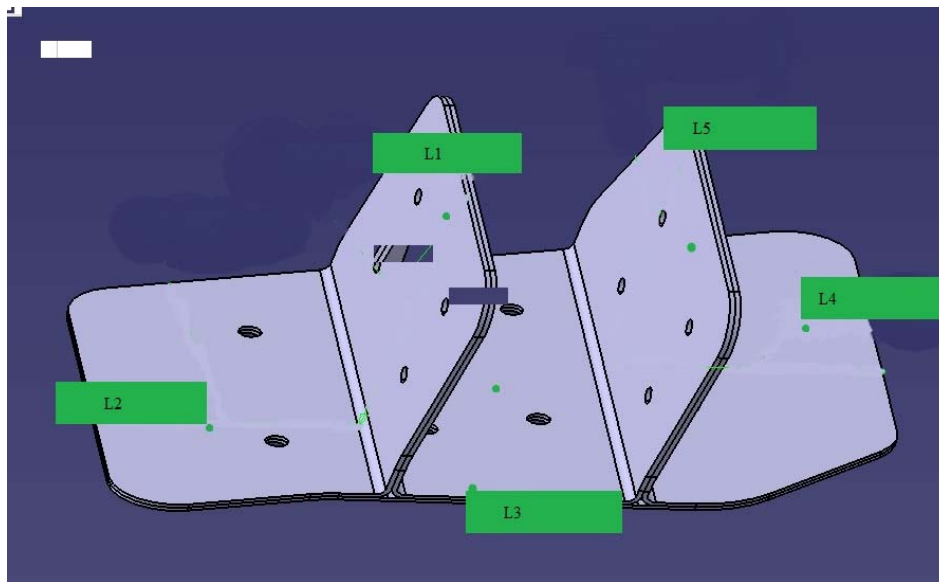


Fig. 1. Measurement log for fitting 013, item № 16

Table 1

Measurement log for fitting 013, item № 16

Size	Rated value, mm	Actual value, mm
L1	2,8	3
L2	2,8	3
L3	2,8	2,9
L4	2,8	2,8
L5	2,8	2,9

Table 2

Example of checklist of item № 16

Item name	Fitting
Sample number	16
Reinforcement schedule	[0; 45]4
Lay-up note	Laying on hot machining attachments
Compression ratio	0,25
Compression note	Pressing after holding 30 minutes at 160 °C

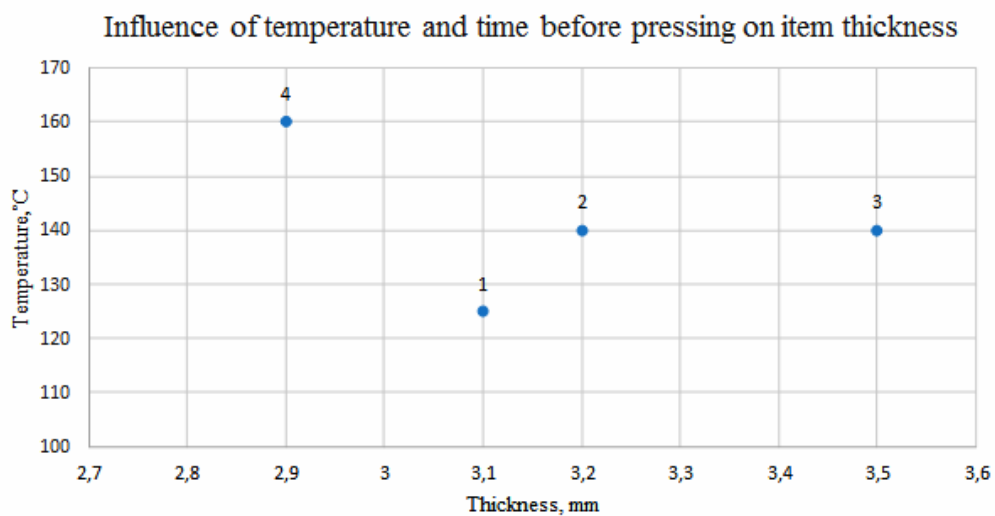


Fig. 2. Influence of temperature and time before pressing on item thickness

Taking into consideration obtained data, we may conclude that it is possible to achieve the minimum gap between parts of machining attachments at rational time of 30 min and a temperature of 160 °C and, as a result, to reach required item thickness.

#### References

1. Bobovich B. B. Polimernye konstruktsionnye materialy. Struktura, svoystva, primeneniye (Polymer structural material. Structure, characteristics, application). Moscow, Infra-M, 2014. 400 p.
2. Vliyanie tekhnologii podgotovki preprega na svoystva PKM (Influence of prepreg preparing on characteristics of PCM) / E. A. Veshkin, P. A. Abramov, V. P. Postnov, S. V. Strelnilov // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2013. № 9. P. 8–14.
3. Kalinichenko N. P., Kalinichenko A. N. Vizualnyy i izmeritelnyy kontrol (Visual and measuring testing). Tomsk : Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 300 p.
4. Zaytsev S. A., Griбанov D. D., Tolstov A. N. Kontrolno-izmeritelnye pribory i instrumenty (Monitoring and measuring tools). Moscow, Akademiya, 2016. 464 p.
5. Klassifikator metodov i sredstv nerazrushayushchego kontrolya konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov (Classifier of methods and tools of nondestructive inspection for polymer composite

designs) / I. M. Kruglyanskiy et al. // Nauch. tr. МАТИ им. К. Э. Циолковского. 2003. № 6 (78). P. 222–226.

#### Библиографические ссылки

1. Бобович Б. Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М. : Инфра-М, 2014. 400 с.
2. Влияние технологии подготовки препрега на свойства ПКМ / Е. А. Вешкин, П. А. Абрамов, В. П. Постнов, С. В. Стрельников // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. № 9. С. 8–14.
3. Калиниченко Н. П., Калиниченко А. Н. Визуальный и измерительный контроль. Томск : Изд-во Том. политехнич. ун-та, 2009. 300 с.
4. Зайцев С. А., Грибанов Д. Д., Толстов А. Н. Контрольно-измерительные приборы и инструменты. М. : Академия, 2016. 464 с.
5. Классификатор методов и средств неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов / И. М. Круглянский и др. // Науч. тр. МАТИ им. К. Э. Циолковского. 2003. Вып. 6 (78). С. 222–226.

© Shcherbakova A. V., Savenkov A. A., Rublevskaja E. V., Sutyagin A. V., Maslova O. V., 2019



**Секция**  
**«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ»**

## РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Т. И. Горбенко<sup>1</sup>, М. В. Горбенко<sup>2</sup>, М. О. Енков<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30  
E-mail: gorbenkoti@rambler.ru

*Манипуляционные роботы с механическим захватом находят применение на борту космического корабля и в открытом космосе. Рассмотрена задача о проектировании захватного устройства и подборе пневмопривода.*

*Ключевые слова: манипулятор робота, захватное устройство, пневмопривод.*

## CALCULATION OF THE MECHANICAL GRIPPER OF AN INDUSTRIAL ROBOT

T. I. Gorbenko<sup>1</sup>, M. V. Gorbenko<sup>2</sup>, M. O. Enkov<sup>1</sup><sup>1</sup>National research Tomsk State University  
36, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: gorbenkoti@rambler.ru

*Robots with mechanical grippers perform on the spacecraft and in outer space operations of different types. The paper presents the problem of designing a gripper and selecting a pneumatic actuator.*

*Keywords: robotic arm, gripper, pneumatic actuator.*

Одна из актуальных задач исследования и освоения космоса связана с подготовкой специалистов, способных модернизировать существующие и проектировать, внедрять и эксплуатировать новые робототехнические устройства для выполнения сборочных операций космических объектов на орбите, обслуживания аппаратов, проведения погрузо-разгрузочных работ и других операций. Развитие «антропоморфного подхода» средств космической робототехники требует разработки универсальных захватных устройств [1–3]. Захватные устройства (ЗУ), предназначены для захватывания и удержания объектов манипулирования [4; 5].

Цель данной работы – применение методики проектирования и методов расчета основных показателей механического захватного устройства (ЗУ) промышленного робота (ПР), проведение силового анализа ЗУ, определение требуемого усилия захватывания объекта, выбор и расчет основных параметров пневмопривода для оптимальной работы ЗУ ПР.

Для достижения поставленной цели в процессе работы решались следующие задачи:

1. Структурный и кинематический анализ механического захватного устройства.
2. Расчёт нагрузок, возникающих в кинематических парах захватного устройства, при удержании и переносе объекта манипулирования.
3. Расчет основных характеристик пневмопривода для преодоления нагрузки в штоке ЗУ.

В робототехнической отрасли получили применение различные системы автоматизированного проектирования (САПР), разрабатываются САПР захватных устройств. Однако непосредственное выполнение студентами проектных учебных работ по проектированию ЗУ позволяет понять методики расчета, заложенные в САПР, и получить навыки написания своих собственных программ автоматического проектирования и подготовки инженерной документации на разрабатываемый механизм.

Для исследования выбран ползунно-коромысловый механизм захватного устройства с четырехточечным контактом, состоящий из двух противоположно расположенных призматических губок. Для удержания груза сферической или цилиндрической формы ЗУ требует точной установки V-образных губок (см. рисунок).

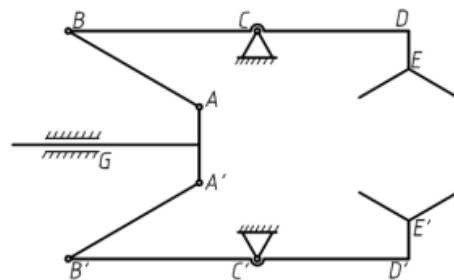


Схема захватного устройства

Из размерных характеристик механизма определены минимально и максимально возможные диаметры объекта манипулирования, который ЗУ способно удерживать. Определен ход штока. Проведен расчет рабочей зоны ЗУ. Рабочая зона зависит от размеров звеньев ЗУ и размеров объекта манипулирования.

При решении задачи силового анализа приняты следующие допущения: не учитываются силы тяжести и силы инерции звеньев, а также силы трения и моменты сил трения в кинематических парах (КП).

Для силового расчета любого механизма (определение реакций в КП, требуемого усилия на ведущем звене) необходимо в первую очередь определить полезную нагрузку на ЗУ. В качестве полезной нагрузки для ЗУ является усилие на губках схвата. Усилие определено в данной работе в критическом положении ЗУ (плоскость ЗУ горизонтальна), масса объекта манипулирования 1,27 кг.

Проведен силовой расчет ЗУ без учета инерционной нагрузки на звенья механизма. Определены все внешние силы, действующие на звенья механизма, реакции во всех кинематических парах, а также необходимое усилие ( $F_y$ ) на входном звене ЗУ (приложенная к штоку уравновешивающая сила, необходимая для удержания объекта манипулирования).

Исследована зависимость усилия на штоке от величины вертикального ускорения схвата,  $F_y(a)$ . Значения вертикального ускорения схвата (предельные вертикальные ускорения перемещения объекта) приняты равными,  $a = 1, 5, 10, 15 \text{ м/с}^2$ . Получено, что увеличение значений вертикального ускорения схвата приводит к увеличению значений силы нормального давления губок на деталь от  $N = 289$  до 333 Н и уравновешивающей силы от  $F_y = 800$  до 924 Н.

По величине уравновешивающей силы ( $F_y$ ) проведен расчет основных характеристик пневмоцилиндра и проведен подбор пневмопривода по каталогам предприятий-изготовителей.

Для подбора пневмопривода диаметр поршня вычислен по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_y}{\pi \cdot p}},$$

где давление системы принимали равным  $p = 1 \text{ МПа}$ .

Определен расход воздуха в пневмоцилиндре  $Q$  за один цикл:

$$Q = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot S \cdot p \cdot n \cdot b,$$

где  $S$  – ход штока;  $n$  – количество циклов ( $n = 1$ );  $b$  – коэффициент, для цилиндров одностороннего действия  $b = 1$ , для двухстороннего  $b = 2$ .

Пневматический привод прост и надежен в эксплуатации. Взрывобезопасность делает возможным применение ЗУ с пневмоприводом в горячих, химических и окрасочных цехах. Малая жесткость пневмопривода позволяет выполнять мягкое захватывание предмета позиционирования, не повреждая его поверхности.

Рассмотренная в работе методика расчета ползуно-коромыслового механизма захватного устройства промышленного робота может быть применена для различных по виду передаточных механизмов механических ЗУ – рычажных, реечных, клиновых с учетом требований на данном производстве.

#### Библиографические ссылки

1. Лопота В. А., Минаков Е. П., Юревич Е. И. Современное состояние и перспективы развития отечественной космической робототехники // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2009. № 1 (59). С. 26–28.
2. Белоношко П. П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журнал. 2016. № 12. С. 110–153.
3. Юревич Е. И. Космическая робототехника: состояние и перспективы развития // Рациональное управление предприятием. Информационные системы [Электронный ресурс]. 2011. № 4. С. 24–26. URL: [http://www.remmag.ru/admin/upload\\_data/remmag/11-4/RTK.pdf](http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/11-4/RTK.pdf) (дата обращения: 30.08.2019).
4. Горбенко Т. И., Горбенко М. В. Основы мехатроники и робототехники : учеб. пособие. Томск : ТГУ, 2012. 125 с.
5. Юревич Е. И. Основы робототехники : учеб. пособие. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 252 с.

#### References

1. Lopota V. A., Minakov E. P., Yurevich E. I. [Current state and prospects of development of domestic space robotics] // *Izvestiya rossyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk*. 2009. № 1 (59). P. 26–28 (In Russ.).
2. Belonozhko P. P. [Space robotics. Current state, future challenges, and development trends. Analytical review] // *Nauka i Obrazovanie*. MGTU im. N. E. Bauman, *Elektronnyy zhurnal*. 2016. № 12. P. 110–153 (In Russ.).
3. Yurevich E. I. *Kosmicheskaya robototekhnika: sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Space robotics: state and prospects of development] [Electronic resource] // *Ratsional'noe upravlenie predpriyatiem. Informatsionnye sistemy*. *Elektronnyy zhurnal*. 2011. № 4. P. 24–26 (In Russ.). URL: [http://www.remmag.ru/admin/upload\\_data/remmag/11-4/RTK.pdf](http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/11-4/RTK.pdf) (accessed: 30.08.2019).
4. Gorbenko T. I., Gorbenko M. V. *Osnovy mekhatroniki i robototekhniki: uchebnoe posobie* [Fundamentals of mechatronics and robotics: tutorial]. Tomsk : TGU, 2012. 125 p.
5. Yurevich E. I. *Osnovy robototekhniki : uchebnoe posobie* [Fundamentals of robotics: tutorial]. SPb. : BKhV-Peterburg, 2010. 252 p.

© Горбенко Т. И., Горбенко М. В., Енков М. О., 2019

## ДВУХКАСКАДНАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КАРДАНЫХ ПЕРЕДАЧ ХОЛОДОМ

Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин\*, В. Г. Шерстюков

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

*Представлена двухкаскадная холодильная установка для испытаний карданных передач холодом, дано описание стенда для испытаний, позволяющего получить температуру охлаждения карданной передачи до –60 градусов, что позволит провести испытания карданных передач в температурных условиях Крайнего Севера и Арктики.*

*Ключевые слова: карданная передача, стенд, подшипниковые узлы, холодильная установка, двухкаскадная машина холода.*

## TWO-CASCADE REFRIGERATING UNIT FOR CARDAN TRANSMISSION TESTS IN COLD

T. T. Eresko, E. V. Kukushkin\*, V. G. Sherstyukov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: ironjeck@mail.ru

*The work presents a two-stage refrigeration unit for testing cardan gears with cold, a test bench is described that allows to obtain a cardan gear cooling temperature of -60 degrees, which will allow cardan gears to be tested in the temperature conditions of the Far North and the Arctic.*

*Keywords: cardan drive, stand, bearing units, refrigeration unit, two-stage cold machine.*

Долговечность отдельных деталей подшипниковых узлов, подтвержденная стендовыми испытаниями, не гарантирует достаточной долговечности всего узла. Последнее обстоятельство связано с тем, что нагрузки, действующие в узле, а также реальная температура могут существенно отличаться от стендовых. Кроме того, сборка и монтаж меняют зазоры, натяги и форму рабочих поверхностей подшипниковых узлов.

Особенно отчетливо противоречие между качеством подшипниковых узлов и собственно подшипниками качения.

Вопрос о механизме физического аспекта усталости металла и усталостного разрушения тел качения под влиянием температуры и усталостного изнашивания изучен не полностью и требует более тщательного изучения, так же как и исследования взаимосвязи первичных усталостных разрушений с дислокацией циклически повторяющихся или чередующихся напряжений в материале деталей [1–4].

Для проведения испытаний карданных передач были разработаны стенды для испытаний [5–8]. Стенд для испытаний карданных передач (рис. 1) состоит из электродвигателя 1, выходной конец которого соединен с технологической передачей 2, соединенной с испытываемой карданной передачей 3, которая установлена в холодильный рукав, установленных на основной раме 4. Выходной вал карданной передачи 3

соединен с входным валом раздаточного редуктора 5, установленного на дополнительной раме 6. Устройство нагружения выполнено гидравлическим и представляет собой гидронасос 7, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора 5. Входной канал гидронасоса 7 соединен с гидравлическим баком 8 с рабочей жидкостью, а его выходной канал присоединен к входному каналу дросселя 9, регулирующему нагрузку. Между дросселем и гидронасосом установлен манометр 10, отградуированный в единицах тормозного момента и предохранительный клапан 11 для выпуска избыточного давления в гидравлический бак 8. Выходной канал дросселя подсоединен к гидравлическому баку, через теплообменник 12. Два компрессора машины холода 13 совместно с рукавом холода 3, внутри которого установлена карданная передача, радиатором 14 и технологической камерой 15 позволяют испытывать карданные передачи при низких температурах.

Схема двухкаскадной холодильной машины представлена на рис. 2. В испарителе IV машины нижнего каскада вырабатывается низкотемпературный холод при кипении низкокипящего холодильного агента в процессе. Образовавшиеся пары откачиваются и сжимаются в компрессоре нижнего каскада I, откуда подаются в испаритель-конденсатор каскадной холодильной машины II. Здесь происходит их конденсация за счет холода вырабатываемого холодильной машиной верхнего каскада.

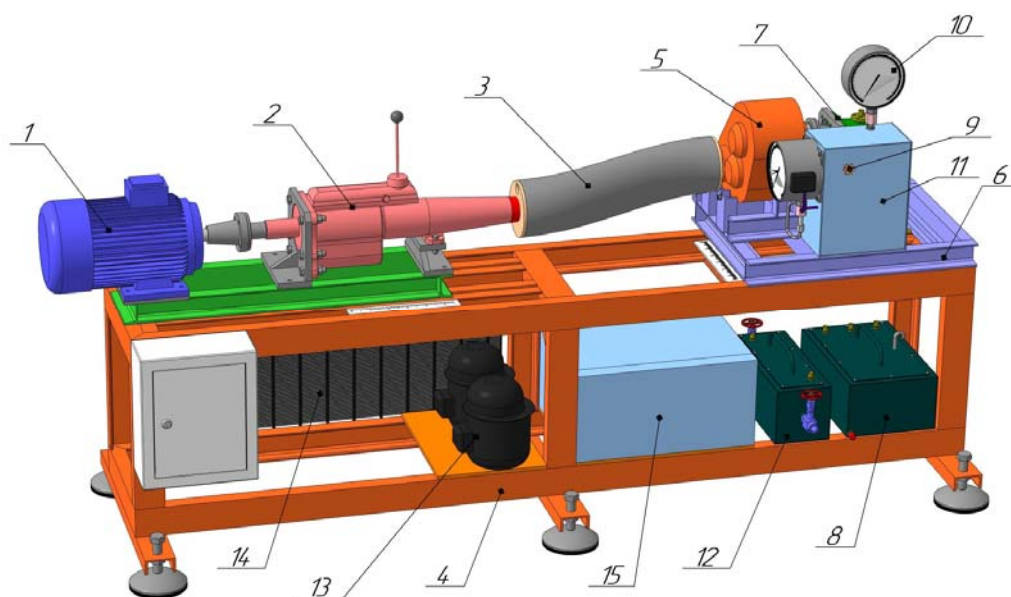


Рис. 1. Стенд для испытания карданных передач (шланги гидравлической системы, подвод воды, электропроводка, трубки холодильной машины не показаны)

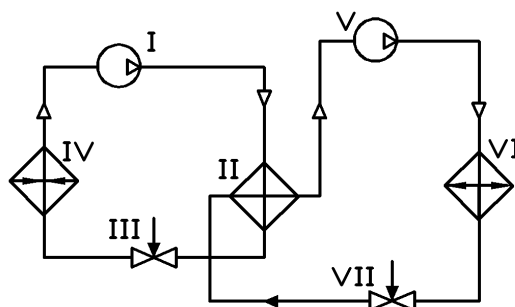


Рис. 2. Схема двухкаскадной холодильной машины

Таким образом, испаритель-конденсатор каскадной холодильной машины II является конденсатором для машины нижнего каскада и испарителем для машины верхнего каскада. Далее холодильный агент дросселируется и снова поступает в испаритель нижнего каскада.

Цикл замыкается. Холодильная машина верхнего каскада работает на более высококипящем холодильном агенте. Испарившийся в испарителе-конденсаторе II хладон откачивается и сжимается в компрессоре верхнего каскада V, откуда подается в конденсатор VI машины верхнего каскада, где конденсируется, дросселируется и снова подается в испаритель-конденсатор.

Поскольку холодильные машины обоих каскадов заправлены различными холодильными агентами, давление в них можно регулировать, подбирая тот, либо иной холодильный агент. Это является большим преимуществом. К недостаткам многокаскадных холодильных машин следует отнести наличие температурного перепада между холодильными агентами ма-

шин верхнего и нижнего каскадов в испарителе-конденсаторе.

Основными достоинствами применения многокаскадных холодильных машин является отсутствие повышенного давления в конденсаторе и больших перепадов давлений. Для испытаний карданных передач рассмотрим двухкаскадную низкотемпературную камеру, где низкотемпературный холод получаем в испарителе нижнего каскада холодильной машины, при этом испаритель второго каскада вырабатывает холод для конденсации в машине предыдущего каскада. Нам же необходима температура охлаждения карданных передачи до  $-60$  градусов, что позволит провести испытания карданных передач в температурных условиях крайнего севера и Арктики.

#### Библиографические ссылки

1. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.
2. Popov V. L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis

zur numerischen Simulation, Springer-Verlag. 2009. 328 p.

3. Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications, Springer-Verlag. 2010. 362 p.

4. Hyun S., Robbins M. O. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths. *Tribology International*, 2007. Vol. 40. P. 1413–1422.

5. Планирование эксперимента по исследованию карданных передач на игольчатых подшипниках / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // *Вестник СибГАУ*. 2016. Т. 17, № 4. С. 1062–1071.

6. Сравнительный анализ конструкций испытательных стендов для испытания карданных шарниров / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 4. С. 902–909.

7. Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, № 1. С. 120–136.

8. Совершенствование методики расчета угла закручивания карданной передачи с использованием теоретических и экспериментальных исследований / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин, В. А. Меновщиков // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, № 4. С. 668–676.

2. Popov V. L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation, Springer-Verlag. 2009. 328 p.

3. Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications, Springer-Verlag. 2010. 362 p.

4. Hyun S., Robbins M. O. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths. *Tribology International*, 2007. Vol. 40. P. 1413–1422.

5. Planning of experiment on research of cardan transmissions on the needle-shaped bearing // S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Vestnik SibGAU*. 2016. № 17. P. 1062–1071 (In Russ.)

6. Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2017. Vol. 18, № 4. P. 902–909 (In Russ.)

7. Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2018. Vol. 19, № 1. P. 120–136.

8. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshikov V. A. [Improvement of the method of calculating the universal joints transmission angle with the use of theoretical and experimental studies] // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 19, № 4. P. 668–676 (In Russ.).

### References

1. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.

© Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Шерстюков В. Г., 2019



УДК 621.89

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ВИЛОК КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ**

Т. Т. Ереско, И. Ю. Ермиенко, Н. А. Ермиенко

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

*Приведен обзор конструкций карданных вилок и карданных шарниров. Приведены недостатки и достоинства разработанных конструкций, представлены способы и современные методы исследований.*

*Ключевые слова: карданный вал, карданный шарнир, оптимизация конструкций, вилка карданного вала, карданный вал неравных угловых скоростей.*

**STUDY OF STRESSES IN THE DESIGN OF FORKS OF CARDAN GEARS**

Т. Т. Eresko, I. Yu. Ermienko, N. A. Ermienko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: Ivaniuscha@mail.ru

*An overview of the structures of the gimbal plugs and universal joint. Disadvantages and advantages of the developed designs are given, methods and modern methods of research are presented.*

*Keywords: cardan shaft, universal joint, design optimization, fork, propeller shaft, propeller shaft unequal angular velocities.*

Количество машин с каждым годом становится все больше и больше, поэтому актуальность проблемы повышения эффективности и понижение стоимости также повышается. Важным агрегатом механической трансмиссий является карданные передачи с шарниром неравных угловых скоростей.

На данный момент в этой отрасли идет применение новых видов закалки, смазки и материалов. Известна технология ионно-лучевой обработки ионная имплантация – внедрение ускоренных ионов в твердые тела [1]. Суть метода заключается в поверхностной обработке карданного шарнира ионами с энергией, достаточной для их внедрения в поверхностные слои материала. Пороговая энергия, выше которой начинается внедрение ионов, составляет примерно  $3 \cdot 10^{-18}$  Дж. Обычно рассматривают три энергетических диапазона ионной имплантации: низкоэнергетическая (10–17 – 10–16 Дж), имплантация ионов средних энергий (10–15 – 10–14 Дж), высокоэнергетическая имплантация (10–13 Дж и выше) [2].

Достаточно перспективная область — это оптимизация конструкции карданного шарнира. Сейчас очень мало работ в этой области в нашей стране. Известна работа с вилок карданного шарнира VI типоразмера 500-2201049-A [3], в которой был проведен прочностной анализ, его оценка и впоследствии оптимизация линейных размеров конструкций. Предложена методика оптимизации унифицированных деталей механических передач на примере транспортных и технологических машин. Приведены конструкция

модернизированного карданного шарнира и результаты исследования его напряженно-деформированного состояния с помощью средств САПР.

В работе [4] проведены исследования напряженно-деформированного состояния проушины вилки карданной передачи, в результате которых определены оптимальные размеры проушины вилки. Методика оптимизации параметров конструкции проушины вилки карданной передачи включала в себя следующие этапы:

- 1) оценка прочностных характеристик при нагружении номинальным вращающим моментом;
- 2) оптимизация размеров проушины вилки карданной передачи.

Анализ работ показал, что необходимо исследовать различные формы вилок карданного вала (рис. 1, 2). И оптимизировать конструкцию по методике [4]. Провести конечно-элементный анализ, по методике, представленной в работе [4]. Результаты представлены в таблице.

Различие с аналогами, таково, у карданного шарнира ГГ-050 масса 0,66, у ГЖ-160 масса 2,13, у шарнира формы круг 0,408 кг.

Исходя из анализа работ, оптимизация уменьшает массу, при этом сохраняются относительно небольшие напряжения и уменьшается масса. Полученные результаты дают возможность изготовить опытный образец вилки карданной передачи и провести экспериментальные исследования на оборудовании авторской разработки, описанном в работе [5]

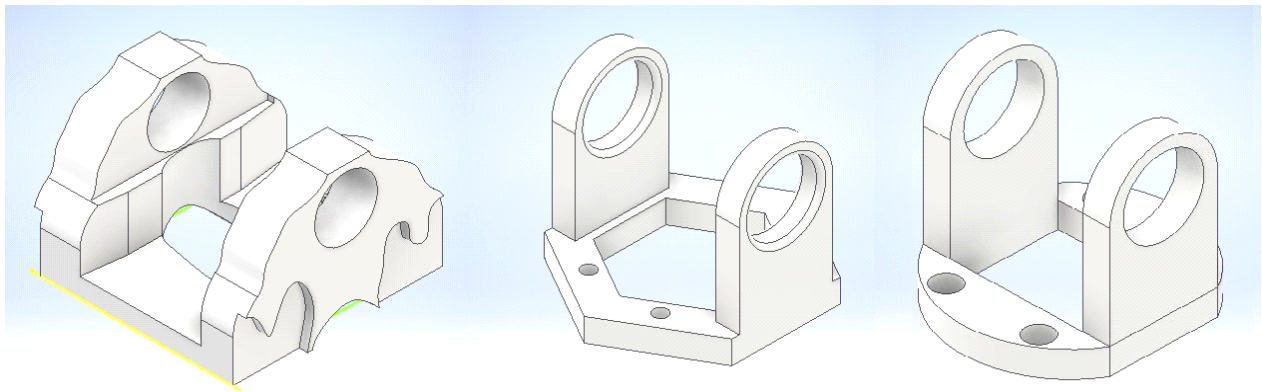


Рис. 1. Карданная вилка – начальная форма куб, шестигранник, круг

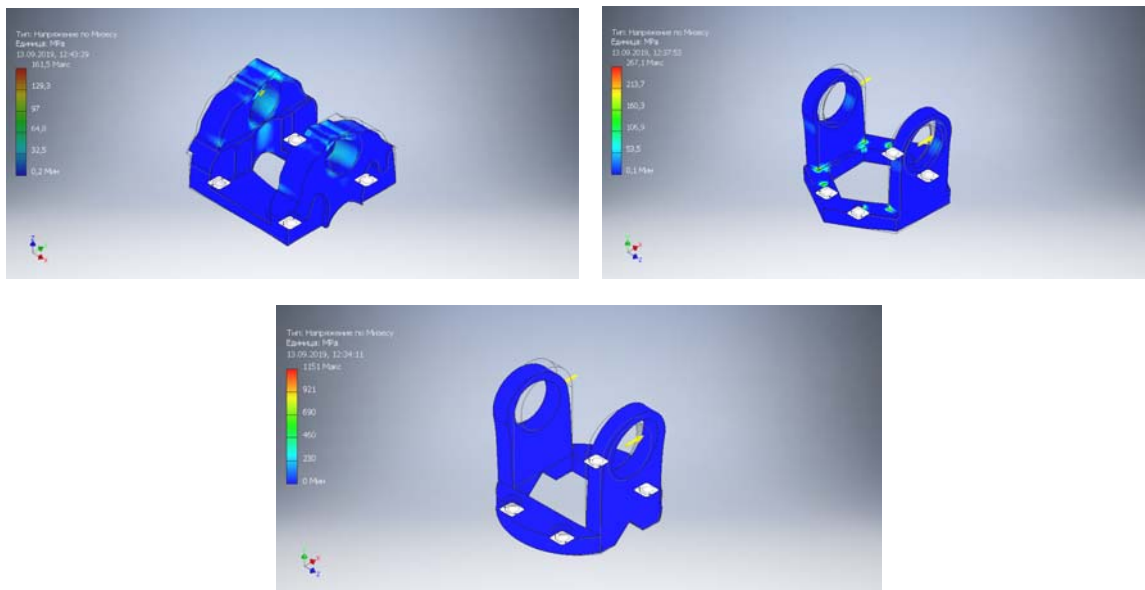


Рис. 2. Конечно-элементный анализ вилок карданных передач

**Характеристики форм вилки**

Форма основания	Масса, кг	Напряжение по мизесу, МПа	Коэффициент запаса прочности	Смещение, мм
Кубическая	1,71942	161,535	1,28145	0,0248097
Круг	0,408	1026,3	0,201695	0,0555126
Шестиугольник	0,46665	267,079	0,775053	0,0736084

**Библиографические ссылки**

1. Лейман К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов : пер. с англ. М. : Атомиздат, 1979. 296 с.

2. Ноздрин В. Ф., Умеренко С. М., Губенко С. И. О механизме упрочнения металлов при сверхглубоком проникновении высокоскоростных частиц // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 6. С. 73–79.

3. Пастухов А. Г. Исследование напряжённо-деформированного состояния деталей модернизируемых узлов трансмиссий различных машин // Автома-

тизированные системы управления. М., 2015. № 8. С. 20–26.

4. Гумарова А. А., Ермиенко И. Ю., Кукушкин Е. В. Исследование напряженно-деформированного состояния проушины вилки карданной передачи // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч. конф. ; СибГУ им. ак. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 474–477.

5. Планирование эксперимента по исследованию карданных передач на игольчатых подшипниках / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1062–1071.

### References

1. Leyman K. Interaction of radiation with a solid body and formation of elementary defects. Moscow, Atomizdat, 1979. 296 p.
2. Nozdrin V. F., Umerenko S. M., Gubenko S. I. on the mechanism of metal hardening at ultra-deep penetration of high-speed particles // Physics and chemistry of materials processing. 1991. № 6. P. 73–79.
3. A. G. Pastukhov, study of stress-strain state of parts of modernized transmission units of various machines // Automated control systems. Moscow, 2015. № 8. P. 20–26.
4. Gumarova A. A., Eremenko I. Yu., Kukushkin E. V. Investigation of the stress-strain state of the eye of the

cardan transmission fork // Reshetnev readings: proceedings of the XXII international. scientific. Conf.; DL them. AK. M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2018. P. 474–477.

5. Improvement of the method of calculating the universal joints transmission angle with the use of theoretical and experimental studies / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // Siberian Journal of Science and Technology. 2018, Vol. 19, № 4, P. 668–676 (In Russ.).

© Ереско Т. Т., Ермиенко И. Ю.,  
Ермиенко Н. А., 2019

УДК 622.24:681.52

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ГИДРОПРИВОДА ПОВОРОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В. Г. Жубрин, А. С. Ереско, С. П. Ереско

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: v2551439@gmail.com

*Приведены результаты исследования на математической модели динамики гидравлического привода механизма вращения поворотной платформы одноковшового экскаватора в режиме её торможения. Сделаны предложения по устранению вероятных причин отказов гидроэлементов.*

*Ключевые слова: математическая модель, гидропривод, кавитация, механизм вращения.*

## MODERNIZATION OF THE HYDRAULIC DRIVE OF THE ROTARY PLATFORM OF THE EARTH MACHINE BASED ON DYNAMIC ANALYSIS

V. G. Zhubrin, A. S. Eresko, S. P. Eresko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: v2551439@gmail.com

*The results of a study on a mathematical model of the dynamics of the hydraulic drive of the rotation mechanism of a rotary platform of a single-bucket excavator in the mode of its braking are presented. Proposals have been made to address the likely causes of failure of hydraulic elements.*

*Keywords: mathematical model, hydraulic drive, cavitation, rotation mechanism.*

Задачи математического моделирования и динамического анализа приводов машин возникают постоянно. Это связано с тем, что в современных машинах привод представляет сложную систему, для которой непрерывное чередование процессов разгона и торможения является нормальным эксплуатационным режимом. В данной работе в качестве объекта исследования выбран гидравлический привод механизма вращения поворотной платформы гидравлического одноковшового экскаватора. Следует отметить, что поворотная платформа широко используется в конструкциях современных мобильных машин различного назначения. Основными гидроэлементами привода являются: сдвоенный гидронасос, гидромотор, распределительная и предохранительная (обратные и предохранительные клапаны) аппаратура. Принятыми допущениями математической модели являются: рабочая жидкость имеет постоянную вязкость, плотность и объёмный модуль упругости [1–5].

Главной задачей исследования являлось выявление эксплуатационных ситуаций, приводящих к преждевременным отказам гидрооборудования. Результаты исследования режима торможения платформы позволили установить существенные проблемы.

Поворотная платформа, обладая большим моментом инерции, в режиме торможения создаёт на валу гидромотора значительный крутящий момент обратного знака. Это приводит к возникновению ситуации, когда гидромотор начинает работать в режиме гидронасоса, падению давления ( $P_2$ ) на входе в гидромотор

и столь же резким возрастанием давления ( $P_3$ ) на его выходе (рис. 1) При определенных условиях в трубопроводе высокого давления может возникнуть недостаток рабочей жидкости. Для восполнения этого недостатка в гидросистеме предусмотрены обратные клапаны, которые открываясь, соединяют всасывающую полость гидромотора с трубопроводом слива. Однако мгновенному открытию клапана препятствуют инерционные, упругие и гидродинамические силы.

Вследствие запаздывания открытия обратного клапана на входе гидромотора наблюдается разрыв рабочей жидкости, что, в конечном счете, приводит к появлению разряжения и условий для возникновения кавитации. Не смотря на локальный характер кавитации, действие её приводит к разрушению поверхностей цилиндров и поршней аксиально-поршневого гидромотора, стенок жёстких и гибких трубопроводов. Продолжительность разряжения на входе гидромотора определяется величиной давления слива и составляет 0,022 с, при давлении слива 0,1–0,2 МПа, что по техническим условиям эксплуатации экскаватора является недопустимым, и требует разработки специальных мероприятий по ликвидации этого явления.

С целью повышения долговечности элементов привода в существующую гидравлическую схему предлагается ввести блок предохранительных клапанов с переливным золотником непрямого действия [1; 3; 6], предназначенный для предотвращения разрыва струи рабочей жидкости во всасывающем трубопроводе гидромотора в экстренных ситуациях.

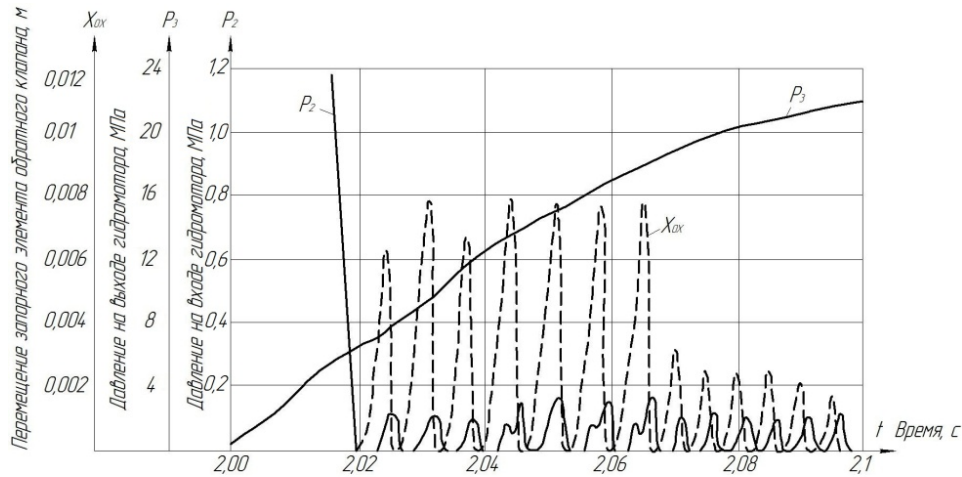


Рис. 1. Зависимость давления на входе и выходе гидромотора и перемещения запорного элемента обратного клапана от времени при торможении

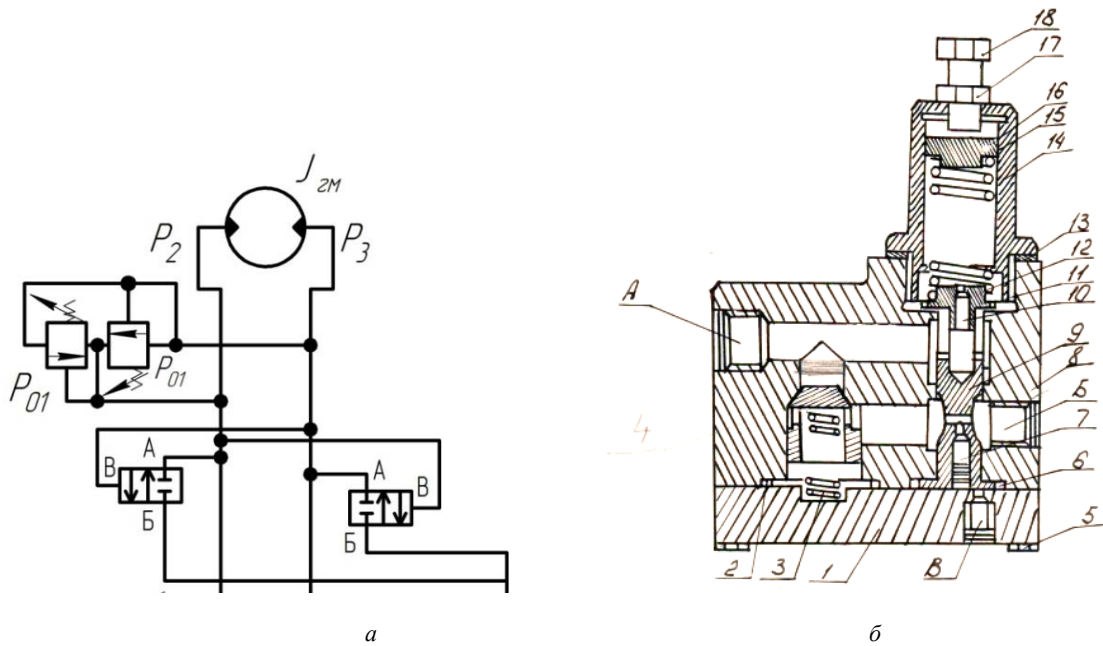


Рис. 2. Модернизированная гидросхема (а) и схема клапана с переливным золотником непрямого действия (б):

- 1 – крышка; 2 – резиновое кольцо; 3 – пружина; 4 – обратный клапан; 5 – болт; 6 – резиновое кольцо; 7 – золотник; 8 – корпус; 9 – золотник; 10 – резиновое кольцо; 11 – втулка; 12 – пружина; 13 – прокладка; 14 – колпачок; 15 – поршень; 16 – резиновое кольцо; 17 – гайка; 18 – винт; А, Б и В – каналы

В процессе исследований разработан вариант гидравлической схемы, с использованием блока клапанов модели «У» (рис. 2, а). На клапанах блока указаны каналы А, Б и В. Схема одного из данного вида клапанов приведена на рис. 2, б.

#### Библиографические ссылки

1. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы : учеб. пособие для втузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев,

Б. Б. Некрасов и др. 2-е изд., перераб. М. : Машиностроение, 1982. 422 с.

2. Ереско С. П., Жубрин В. Г., Шустов В. Л. Разработка и исследование математической модели гидропривода бурильной машины // Строительные и дорожные машины. 2009. № 3. С. 37–41.

3. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование мобильных машин : справочник. М. : Машиностроение, 1983. 301 с.

4. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / под ред. Е. Ю. Малиновского. М. : Машиностроение, 1980. 216 с.

5. Гоберман Р. А. Основы теории, расчёта и проектирования строительных и дорожных машин. М. : Машиностроение, 1988. 463 с.

6. Патент РФ на изобретение № 2233237 Гидросистема управления рабочим оборудованием фронтального погрузчика / А. С. Ереско, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско и др. ; по Заявке № 2003107360/06(007667) ; приоритет 17.03.2003. Опубл. 27.07.2004.

#### References

1. Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives : textbook. allowance for technical colleges / T. M. Bashta, S. S. Rudnev, B. B. Nekrasov et al. 2nd ed., Revised. Moscow, Mechanical Engineering, 1982. 422 p.

2. Eresko S. P., Zhubrin V. G., Shustov V. L. Development and research of a mathematical model

of a hydraulic drive of a drilling machine // Construction and road machines. 2009. № 3. P. 37–41.

3. Vasilchenko V. A. Hydraulic equipment of mobile machines. Directory. Moscow, Mechanical Engineering, 1983. 301 p.

4. Calculation and design of construction and road machines on a computer / ed. E. Yu. Malinovsky. Moscow, Mechanical Engineering, 1980. 216 p.

5. Goberman R.A. Fundamentals of the theory, calculation and design of construction and road machines. Moscow, Mechanical Engineering, 1988. 463 p.

6. RF patent for invention No. 2233237 Hydraulic control system for working equipment of a front-end loader / A. S. Eresko, S. P. Eresko, T. T. Eresko et al. // by Application № 2003107360/06 (007667) priority 17.03.2003. Publ. 27.07.2004.

© Жубрин В. Г., Ереско А. С.,  
Ереско С. П., 2019

УДК 669/713-048/25

## МНОГОЦИКЛОВОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СИЛУМИНА ТИТАНОМ\*

Ю. Ф. Иванов<sup>1</sup>, А. А. Клопотов<sup>2\*</sup>, С. П. Ереско<sup>3</sup>, Е. А. Петрикова<sup>1</sup>, И. В. Лопатин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет  
Российская Федерация, 634002, г. Томск, пл. Соляная, 2

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

*Авиакосмическая отрасль является одним из основных потребителей силуминов (сплавы алюминия с кремнием), многоцикловое легирование которых титаном электронно-ионно-плазменным методом позволило многократно повысить трибологические свойства материала.*

*Ключевые слова: силумин, титан, электронно-ионно-плазменная обработка, наноструктура, свойства.*

## MULTI-CYCLE SURFACE ALLOYING OF SILUMIN BY TITANIUM

Yu. F. Ivanov<sup>1</sup>, A. A. Klopotov<sup>2\*</sup>, S. P. Eresko<sup>3</sup>, E. A. Petrikova<sup>1</sup>, I. V. Lopatin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of High Current Electronics (IHCE) of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
2/3, Akademicheskij Av., Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building  
2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634002, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

*The aerospace industry is one of the main consumers of silumins (aluminum alloys with silicon), the multi-cycle alloying of which with titanium by the electron-ion-plasma method made it possible to repeatedly increase the tribological properties of the material.*

*Keywords: silumin, titanium, electron-ion-plasma treatment, nanostructure, properties.*

**Введение.** Сплавы алюминия, содержание кремния в которых изменяется в пределах (4–22) вес. %, называют силуминами [1]. Низкая стоимость в сочетании с технологичностью позволяют широко использовать силумины в промышленности, а именно, в машиностроении (поршни, детали для корпуса, цилиндры двигателя), авиастроении (блоки цилиндров, поршни для охлаждения, авиационные узлы), космонавтике (детали с низким значением температурного коэффициента линейного расширения и высоким уровнем механических свойств), и т. д. [1]. В [2] показано, что облучение силумина интенсивным импульсным электронным пучком приводит к плавлению и высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя, толщина которого может достигать сотен микрометров, растворению включений литого состояния, залечиванию микро- и макропор, формированию субмикронанокристаллической многофазной структуры, обладающей высокими механическими и трибологическими свойствами.

Целью настоящей работы является структурно-фазовая аттестация силумина, подвергнутого многоцикловому легированию титаном.

**Материал и методики исследования.** Материалом исследования являлся силумин марки АК12 в литом состоянии (ГОСТ 1583–93). Образцы для исследований имели форму пластинок размерами 20×20×8 мм. Эксперименты проводили на установке «КОМПЛЕКС», позволяющей реализовывать в едином вакуумном пространстве 1 ионную очистку и нагрев образцов плазмой; 2 плазмо-ассистированное электродуговое нанесение металлических пленок или керамических покрытий; 3 облучение интенсивным импульсным электронным пучком. Данные виды обработки могут производиться в разной последовательности и многократно повторяться без нарушения вакуума. Легирование поверхностного слоя силумина осуществляли титаном. Толщина пленки титана в каждом цикле «напыления/облучения» 0,5 мкм. Количество циклов 1, 5 и 10.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-48-700010 и проект № 19-52-04009).

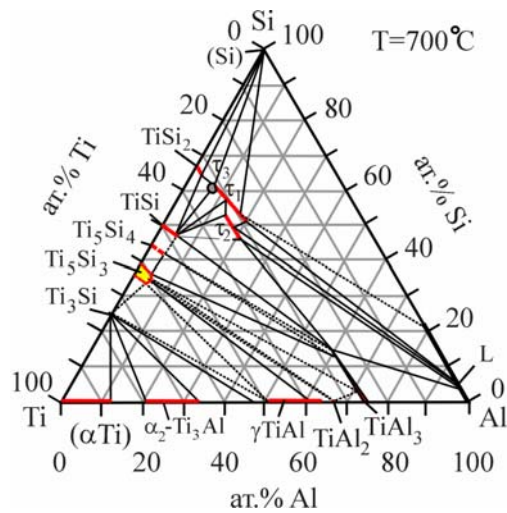


Рис. 1. Изотермическое сечение в тройной системе Al-Ti-Si при 1000 °С [3]

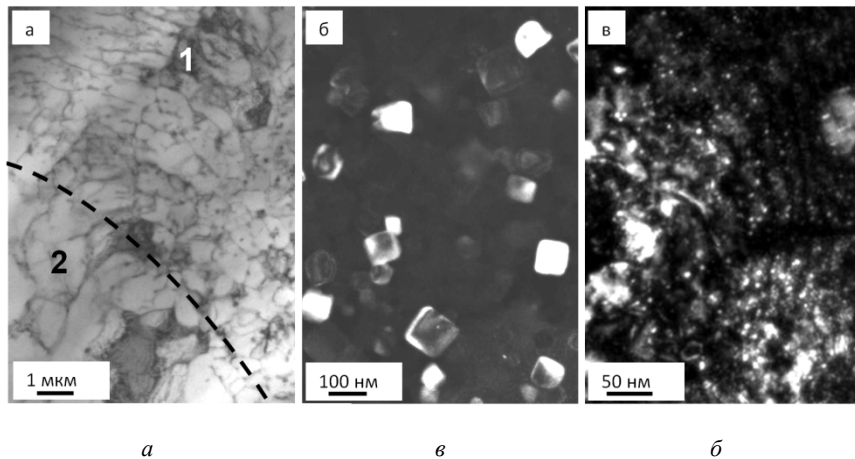


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина АК12, подвергнутого многоциклового легированию титаном:  
 а – светлопольное изображение (1 – слой, легированный титаном; 2 – слой термического влияния);  
 б – темнопольное изображение в рефлексе [112]  $Al_3Ti$ ; в – темнопольное изображение в рефлексе [122]  $TiSi$

Исследование структуры силумина осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000), сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F) электронной микроскопии. Анализ элементного состава образцов осуществляли методами SEM/EDAX. Свойства модифицированного слоя характеризовали, определяя износостойкость (прибор TRIBOtechnik; условие сухого трения при комнатной температуре, контртело – шарик ШХ15 диаметром 6 мм, радиус трека 2 мм, скорость вращения образца 2,5 см/с, нагрузка на индентор 5 Н, количество оборотов 8000). Износостойкость поверхностного слоя материала рассчитывали после проведения профилометрии образовавшегося трека.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Установлено, что многоциклового легирование силумина титаном сопровождается плавлением поверхностного слоя, растворением в слое толщиной до 30 мкм вклю-

чений кремния и интерметаллидов, формированием структуры, размеры кристаллитов которой, выявленные методами сканирующей электронной микроскопии, изменяются в пределах от 0,2 мкм до 1 мкм.

На рис. 1 приведено изотермическое сечение тройной системы Al-Ti-Si [3] демонстрирующее большое число соединений, которые образуются в этой системе при равновесных условиях.

Количество соединений на основе силицидов с Ti, которые образуются в неравновесных условиях, значительно больше. Это обусловлено в частности с тем, что силициды титана нельзя относить к соединениям типа фаз внедрения, поскольку они не удовлетворяют условию Хэгга и в них наблюдается значительное превышение хегговского критического отношения 0,59. В соединениях  $Al_NTi_M$  замещение атомами Si сопровождается образованием сложных кристаллических металлических структур при отношении  $(R_{Si} / R_{Me}) > 0,9$ .



Методами рентгенофазового анализа установлено, что в литом состоянии исследуемый силумин, наряду с алюминием и кремнием, содержит многоэлементные фазы состава  $Al_9Fe_2Si_2$  и  $Al_3FeSi_2$ . После одного цикла легирования в поверхностном слое методами рентгенофазового анализа выявлены алюминий, кремний и титан; после пяти и десяти циклов легирования дополнительно выявляются алюминиды титана состава  $TiAl$  и  $TiAl_3$ , содержание которых максимально (56 масс. %) после пяти циклов.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что формирующаяся при модифицировании структура поверхностного слоя является субмикро-нанокристаллической (рис. 2, а).

Алюминиды титана состава  $Al_3Ti$  имеют форму кубоидов, размеры которых изменяются в пределах от 20 нм до 100 нм (рис. 2, б). Алюминиды титана  $TiAl$  и силициды титана  $TiSi$  имеют округлую форму, размеры частиц (10–30) нм (рис. 2, в).

Установлено, что износостойкость модифицированного силумина достигает максимальных значений после пяти циклов обработки и превышает износостойкость литого силумина более чем в 14 раз.

**Заключение.** Выявлено формирование в поверхностном слое толщиной до 30 мкм силумина марки АК12, в результате многоциклового легирования титаном в едином вакуумном пространстве, субмикро-нанокристаллической многофазной структуры, характеризующейся высокой износостойкостью, превосходящей износостойкость литого силумина более чем в 14 раз.

### Библиографические ссылки

1. Light alloys: metallurgy of the light metals / Ian Polmear, David St. John, Jian-Feng Nie, etc. // Fifth edition. Oxford, United Kingdom : Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 525 p.

2. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А. П. Ласковнев, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова и др. Минск : Беларус навука, 2013. 287 с.

3. Brukl C., Nowotny H., Schob O., Benesovsky F. The Crystal Structure of  $TiSi$ ,  $Ti(Al, Si)_2$  and  $Mo(Al, Si)_2$  Monatsh. // Chem. 1961. Vol. 92. P. 781–788.

### References

1. Light alloys: metallurgy of the light metals / Ian Polmear, David St. John, Jian-Feng Nie, e. a. // Fifth edition. Oxford, United Kingdom : Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 525 p.

2. Laskovnev A. P., Ivanov Yu. F., Petrikova E. A. etc. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoy obrabotkoy* [Modification of structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment]. Minsk : Belarus navuka, 2013. 287 p.

3. Brukl C., Nowotny H., Schob O., Benesovsky F. The Crystal Structure of  $TiSi$ ,  $Ti(Al, Si)_2$  and  $Mo(Al, Si)_2$  Monatsh. // Chem. 1961. Vol. 92. P. 781–788.

© Иванов Ю. Ф., Клопотов А. А., Ереско С. П., Петрикова Е. А., Лопатин И. В., 2019

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ КОЛОДОК

А. А. Климов, А. В. Стручков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: str-alex-v@mail.ru

*В результате экспериментальных исследований были получены статистические распределения твердости и остаточной толщины, выявлена зависимость остаточной толщины тормозных колодок (износа) от их твердости, которые показали неэффективность использования материала этих деталей. Обследование технологии технического обслуживания тормозных механизмов выявило организационно-технологические недостатки в плане проведения работ по регулированию зазоров в сопряжении колесо-колодка, что приводит к клиновидному износу тормозных локомотивных колодок.*

*Ключевые слова: тормозные локомотивные колодки, колесная пара, износ, остаточная толщина, твердость, метод математической статистики, математическое ожидание.*

## RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF WEAR OF THE BRAKE PAD FOR LOCOMOTIVE

A. A. Klimov, A. V. Struchkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: str-alex-v@mail.ru

*In the result of experimental researches were obtained the statistical distribution of hardness and residual thickness, the dependence of the residual thickness of brake pads (wear and tear) from their hardness, which showed the inefficient use of material of these parts. A survey of maintenance practices of the brakes revealed the organizational and technological deficiencies in the plan of work for regulation of gaps in the pair wheel-pad, which leads to a wedge-shaped wear of the brake pads of the locomotive.*

*Keywords: locomotive brake pads, wheelset, wear, residual thickness, hardness, method of mathematical statistics, mathematical expectation.*

Взаимодействие колесной пары и тормозной колодки (система «колесо–тормозная колодка») является фундаментальной комплексной проблемой железнодорожного транспорта [1–5], обеспечивающей гарантированную безопасность движения поездов и транспортировку изделий ракетно-космической техники, грузов снабжения, как на магистралях, так и на технологических путях самолетостроительных заводов, космодромов.

С целью оценки потерь материала тормозных локомотивных колодок от их неравномерного износа по причине изменчивости твердости на предприятии СЛД 77 Красноярск были проведены обследования более 300 отработанных тормозных локомотивных колодок.

Проведены измерения твердости на поверхностях отработанных колодок и измерение остаточной толщины. Проведена статистическая обработка полученного материала с помощью методов математической статистики.

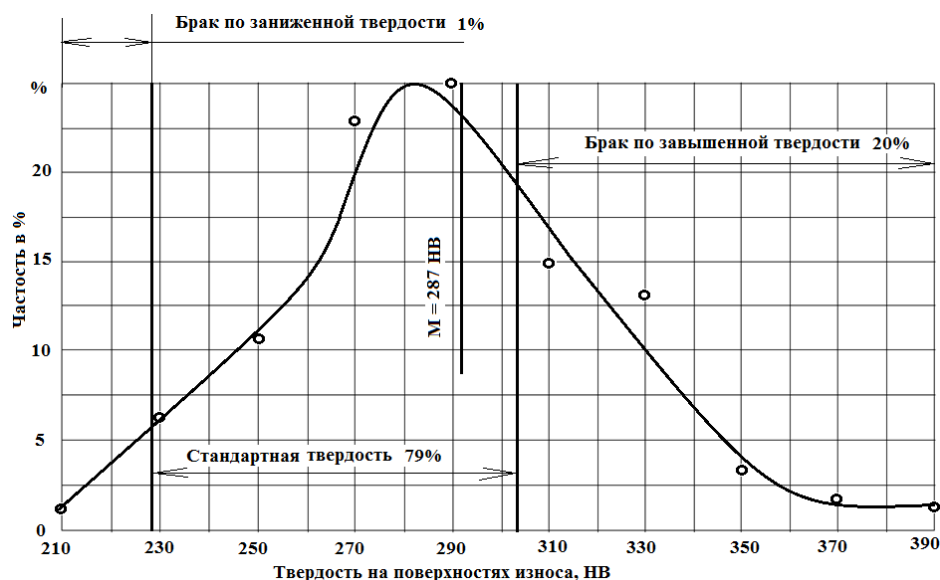
Были получены статистические распределения твердости и остаточной толщины, выявлена зависимость остаточной толщины тормозных колодок (из-

носа) от их твердости. Установлено, что износ тормозных колодок варьируется в пределах от 5 мм до 30 мм, т. е. на 600 %. Это приводит к неравномерности продолжительности их работы. Колодки с твердостью свыше 330НВ не выработывают свой ресурс, а колодки мягкие выработывают свой ресурс очень быстро и приходится их менять чаще. То и другое определяет неэффективность использования материала этих деталей.

Математическое ожидание твердости изношенной поверхности составило 287 НВ, что близко к верхнему пределу по стандарту. Коэффициент вариации твердости составил  $\gamma = \sigma / m \times 100 = 11,9 \%$ .

Полученное значение твердости показывает, что математическое ожидание сдвинуто в сторону повышенной твердости, кроме того, имеется в данной партии колодок большой процент брака по завышенной твердости (20 %), что говорит о балансе углерода в структуре в сторону увеличения цементитной составляющей.

Соответственно содержание графита в структуре резко ограничено (увеличена вероятность возникновения патологических износов бандажей).



Распределение твердости тормозных колодок на поверхностях износа

Проведенные измерения остаточного веса тормозных колодок показали, что износ тормозных колодок практически пропорционален их твердости (см. рисунок). Чем выше твердость, тем меньше износ чугуна. Темп изменения износа составляет около 500 грамм на каждые 10 единиц твердости по Бринеллю.

В результате анализа полученных данных установлено, что 20 % тормозных колодок имеют завышенную твердость (выше 303НВ), износ материала тормозных колодок зависит от их твердости, тормозные колодки с твердостью ниже стандартной (ниже 229НВ) изнашиваются слишком быстро, их приходится менять досрочно часто, применение на одном локомотиве тормозных колодок различной твердости приводит к неэффективному расходу их материала.

Обследование технологии технического обслуживания тормозных механизмов выявило организационно-технологические недостатки в плане проведения работ по регулированию зазоров в сопряжении колесо-колодка, что приводит к клиновидному износу тормозных локомотивных колодок, что увеличивает интенсивность износа колодок. Расчет показал, что за счет клиновидного износа потери материала тормозных колодок в среднем на 10,5 % больше.

#### Библиографические ссылки

1. Красиков Г. В. Повышение ресурса чугунных тормозных колодок локомотива // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 2. С. 35–38.
2. Вуколов Л. А. Повышение работоспособности тормозных колодок подвижного состава железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1988. 428 с.
3. Способ улучшения трибологических характеристик пары «Колесо-тормозная колодка» локомотивов / А. А. Климов, С. В. Домнин, А. В. Стручков и др. // Технические науки – от теории к практике : материалы VIII междунар. конф. СПб., 2016. С. 47–53.
4. Исследование влияния структуры и твердости тормозных колодок на износ бандажей колес локомотивов / А. А. Климов, С. В. Домнин, А. В. Стручков, В. Б. Бондарик // Современные технологии, системный анализ, моделирование. 2017. № 1 (53). С. 215–218.

5. Климов А. А., Стручков А. В. Причины возникновения патологического износа бандажа в системе бандаж колеса локомотива – тормозная колодка и возможности его исключения // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20, № 3. С. 5–11.

#### References

1. Krasikov G. V. Povyshenie resursa chugunnyh tormoznyh kolodok lokomotiva [Increase the resource iron locomotive brake shoes] // *Young scientist*. 2011. Vol. 1, № 2. P. 35–38.
2. Vukolov L. A. Povyshenie rabotosposobnosti tormoznyh kolodok podvizhnogo sostava zheleznyh dorog [Improving the efficiency of the brake pads railway rolling stock] : Doctor's degree diss. M., 1988. 428 p.
3. Sposob uluchsheniya tribologicheskikh harakteristik pary «Koleso-tormoznaya kolodka» lokomotivov [A way to improve the tribological characteristics of a pair of "Wheel brake cylinder" engines] / A. A. Klimov, S. V. Domnin, A. V. Struchkov et al. // *Technical Sciences – from theory to practice : materials of VIII international conference*. SPb., 2016. P. 47–53.
4. Issledovanie vliyaniya struktury i tverdosti tormoznyh kolodok na iznos bandazhej koles lokomotivov. [Study of the effect of structure and hardness of brake pads on the wear and tear of tires of wheels of locomotives] / A. A. Klimov, S. V. Domnin, A. V. Struchkov et al. // *The modern technologies, system analysis, modeling*. 2017. № 1 (53). P. 215–218.
5. Klimov A. A., Struchkov A. V. Prichiny vznikoveniya patologicheskogo iznosa bandazha v sisteme bandazh kolesa lokomotiva – tormoznaya kolodka i vozmozhnosti ego isklyucheniya [The causes of pathological wear of a bandage in system a locomotive wheel bandage – a brake shoe and possibilities of his exception] // *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2018. Vol. 20, № 3. P. 5–11.

## О КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

С. В. Кукушкин, Т. Г. Чабукашвили, К. А. Чайкина\*, В. Г. Шерстюков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: Ksenyachaykina@mail.ru

*Приведен обзор конструкции стенда для испытания карданных передач, таких как стенд для испытаний карданных подшипников. Задачей исследования является создание новых конструкций испытательных стендов, позволяющих проводить исследования при пониженных температурах, близких к эксплуатационным.*

*Ключевые слова: вал, карданная передача, стенд, подшипниковые узлы.*

## ABOUT CLIMATE TESTS OF POWER TRANSMISSIONS

S. V. Kukushkin, T. G. Chabukashvili, K. A. Chaykina\*, V. G. Sherstyukov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: Ksenyachaykina@mail.ru

*An overview of the construction of the stand for testing the universal joint transmissions, such as a stand for the cardan bearing tests. The objective of the study is to create of new constructions of test stands, allowing to carry out research at low temperatures close to operational.*

*Keywords: shaft, universal joint transmissions, stand, bearing units.*

Подшипниковые узлы – это главные структурные элементы машин, которые составляют основную часть узлов трения. Выход из строя зачастую происходит из-за отказа подшипниковых узлов, ограничивающий долговечность машин. Даже при довольно качественном производстве деталей подшипниковых узлов, например игольчатых подшипников качения, характеристики карданной передачи получаются некачественные, и возникнет непредвиденный отказ. Под этим отказом нужно понимать, что не обязательно разрушатся рабочие (трущиеся) поверхности – отказом может являться выход одной из характеристик подшипниковых узлов за допускаемые пределы [1].

Долговечность отдельных деталей подшипниковых узлов, которая подтверждена испытаниями на стенде, не гарантирует достаточной долговечности всего узла. Последнее обстоятельство связано с тем, что нагрузки, которые действуют в узле, и реальная температура могут значительно отличаться от стендовых. Помимо этого, сборка и монтаж изменяют зазоры, натяги и форму трущихся поверхностей подшипниковых узлов. Особенно видны противоречия между качеством подшипниковых узлов и самим подшипником, которое проявляется в узлах именно с подшипниками качения [2–5]

В стендах, применяемых для испытаний карданных передач машин вращение карданного вала, осуществляется по принятой схеме транспортных и технологических машин, а регулирование осуществляется при помощи редукторов. Существует много стендов для испытания карданных передач, основанных

на схожих принципах, но имеющих большую разницу, а также свои достоинства и недостатки.

Стенд для испытания карданных передач состоит из установленных на основной раме электродвигателя, механической коробки переключения передач, соединенной с входным валом испытываемой карданной передачи, выходной вал, которой соединен с устройством нагружения через раздаточный редуктор. Устройство нагружения выполнено в виде гидронасоса, вал которого соединен с выходным валом раздаточного редуктора, входной канал гидронасоса присоединен к гидравлическому баку, а выходной канал соединен с входом дросселя с регулирующим элементом, выход которого через теплообменник соединен с гидравлическим баком, притом между выходным каналом гидронасоса и входом дросселя установлены предохранительный клапан и манометр, отградуированный в единицах тормозного момента.

Устройство нагружения оснащено системой автоматического управления, которая состоит из блока управления, состоящего из задатчика алгоритма функционирования, элемента сравнения, автоматического управляющего устройства, усилителя сигналов, датчик давления и датчик температуры, установленные между гидронасосами входом дросселя с регулирующим элементом и соединенные с элементом сравнения, термоклапан с регулирующим элементом, установленный между выходом дросселя с регулирующим элементом и теплообменником, а также соединенные через датчики положения регулирующего элемента с элементом сравнения соответственно

дроссель и термклапан. Регулирующие элементы дресселя и термклапана оснащены подключенными к выходу усилителя сигналов исполнительными механизмами управления их положением, каждый из которых содержит шаговый электродвигатель и редуктор.

Технический результат заключается в том, чтобы обеспечить стабильный тормозной момент.

Одним из основных недостатков конструкции является невозможность проведения испытаний карданных передач при низких температурах, что является одной из важнейших проблем, без решения которых не может быть достигнут научно-технический прогресс. До сих пор многие вопросы еще не получили четкого ответа ввиду не изученности, либо отсутствия нужного объема исследований

Современные методы научные исследования позволяют изучить элементы конструкций на этапе проектирования, которые могут быть применены, в частности конечно-элементный анализ, в проектировании необходимого оборудования. Карданные механизмы широко используются в технике, в том числе на открытом воздухе, при отрицательных температурах. Задачей наших исследований является разработка конструкции стенда для испытаний карданных передач, позволяющей проводить исследования при пониженных температурах, близким к эксплуатационным. Для этого необходимо изменить климатические условия, которые будут влиять на карданную передачу. Климатические камеры широко используются для испытания стойкости материалов различных типов к воздействию тепла, холода, обезвоживания и влажности. Эти камеры способны моделировать среду с различной температурой и относительной влажностью, меняющуюся в диапазоне от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 10–98 % соответственно. Но использование климатической камеры для данного стенда нецелесообразно из-за ряда причин: Первое, нет необходимости охлаждать весь испытательный стенд, так как это повлияет на работу всех его компонентов. Второе, существующие климатические камеры имеют низкий КПД. Поэтому необходимо локальное охлаждение исследуемого карданного механизма путём помещения его в термоизолированную камеру (трубу) и принудительным охлаждением.

Данный способ может иметь свои недостатки: недостаточная изоляция труб приводит к потере тепла, что не позволит достаточно охладить карданную передачу. Также возможно возникновение конденсата, который, застывая, может уменьшить сечение и затруднить прохождение воздуха.

### Библиографические ссылки

1. Сравнительный анализ конструкций карданных шарниров неравных угловых скоростей / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин, В. А. Меновщиков // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 720–728.
2. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings / Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 1. С. 120–136.
3. Планирование эксперимента по исследованию карданных передач на игольчатых подшипниках / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1062–1071.
4. Повышение долговечности подшипников карданного шарнира неравных угловых скоростей / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // Системы. Методы. Технологии. 2018. Т. 38, № 2. С. 19–24.
5. Повышение долговечности карданной передачи за счет совершенствования конструкции карданного шарнира и способа его технического обслуживания / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин, В. А. Меновщиков // Строительные и дорожные машины. 2018. № 1. С. 45–51.

### References

1. Comparative analysis of designs of cardan joints of unequal angular velocities / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin, V. A. Menovshchikov // *Vestnik SibGAU*. 2015. Vol. 16, № 3. P. 720–728 (InRuss.).
2. Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018. Vol. 19, № 1. P. 120–136.
3. Planning an experiment to study cardan gears on needle bearings / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Vestnik SibGAU*. 2016. Vol. 17, № 4. P. 1062–1071 (InRuss.).
4. Improving the life of bearings u-joint of unequal angular speeds / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2018. Vol. 38, № 2. P. 19–24 (InRuss.).
5. Increasing the durability of the cardan transmission by improving the design of the cardan joint and the method of its maintenance / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin, V. A. Menovshchikov // *Stroitel'nye i Dorozhnyemashiny*. 2018. № 1. P. 45–51 (InRuss.).

© Кукушкин С. В., Чабукашвили Т. Г., Чайкина К. А., Шерстюков В. Г., 2019

УДК 66.015.23

## ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЕЙ НА ВИХРЕВОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ СТУПЕНИ

А. В. Кустов, В. М. Корнев

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

*Представлены результаты исследования гидродинамики вихревой контактной ступени с тангенциальными и осевыми завихрителями потока. Определены режимы течения газо-жидкостной смеси, получены зависимости для расчета газосодержания, диаметров пузырьков газа и межфазная поверхность.*

*Ключевые слова: ректификация, массообмен, паровой пузырь.*

## DYNAMICS OF STEAM BUBBLE FORMATION AT A VORTEX RECTIFICATION STEP

A. V. Kustov, V. M. Kornev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: alexkust@rambler.ru

*The results of a study of the hydrodynamics of a vortex contact stage with tangential and axial flow swirls are presented. The flow regimes of the gas-liquid mixture are determined, and dependences are obtained for calculating the gas content, the diameters of gas bubbles, and the interface.*

*Keywords: rectification, mass transfer, steam bubble.*

В настоящее время наметилась тенденция использования вихревых контактных тепло массообменных ступеней для проведения процессов абсорбции и ректификации в технологических линиях различных процессов. Вихревые колонны не уступают по своим массообменным параметрам самым эффективным аппаратам насадочного типа, однако более производительны, менее металлоемки и масштабируемы. А также имеют сравнительно не высокое гидравлическое сопротивление, что позволяет использовать их для ведения процесса под вакуумом. Основными требованиями, предъявляемыми при конструировании вихревой контактной ступени для ректификационных колонн, является: обеспечение развитой межфазной поверхности, достижение высокой турбулентности потоков и удерживающей способности по жидкости

при сравнительно низком гидравлическом сопротивлении и большой нагрузке по газу. Что может быть достигнуто путем равномерного диспергирования газа в жидкость и создания условий для интенсивного вращательного движения газо-жидкостной смеси на ступени.

Из всего многообразия вихревых контактных ступеней представленных на рис. 1 для тепломассообменных аппаратов наиболее перспективны контактные ступени с тангенциальными.

В указанных конструкция, газ (пар) проходя через щели, приобретает высокую скорость, равномерно распределяется в слое жидкости на ступени, интенсивно дробится, образуя вращающуюся газо-жидкостную смесь, которая также способствует обновлению межфазной поверхности.



а



б

Рис. 1. Фотографии тангенциальных контактных ступеней: а – плоский завихритель; б – тангенциальный завихритель

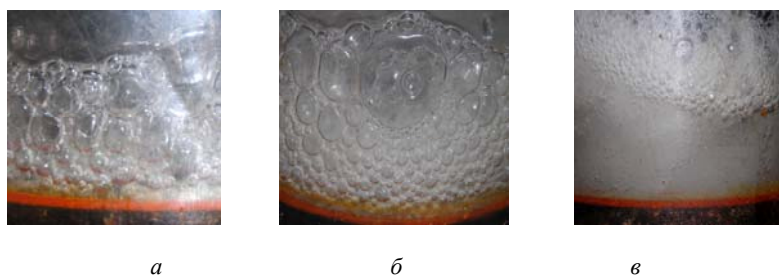


Рис. 2. Фотографии газожидкостной смеси на ступени:  
 а – барботажный режим; б – кольцевой; в – пленочный

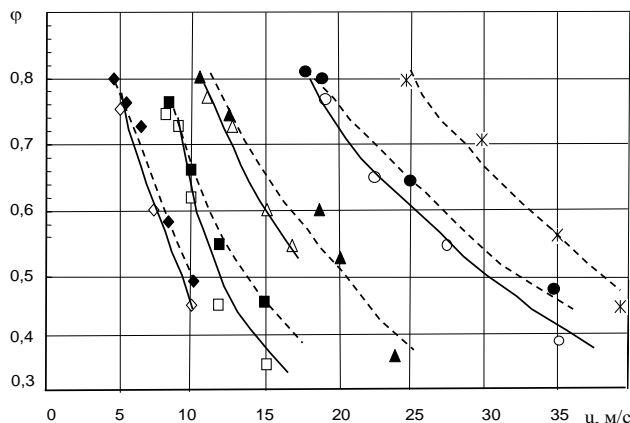


Рис. 3. Зависимость газосодержания от скорости газа в каналах при  $V = 200$  мл при  $1 - f/F = 0,089$ ; 2 – 0,04; 3 – 0,032; 4 – 0,022; 5 – 0,012. Сплошные линии и прозрачные точки – многолопастной осевой завихритель. Пунктирные линии – тангенциальный завихритель

**Режимы течения на ступени.** В зависимости от расхода газа можно выделить три основных режима течения газожидкостной смеси на ступени (рис. 2): барботажный; кольцевой; пленочный.

Для контактных ступеней ректификационных колонн с целью получения развитой межфазной поверхности и низкого гидравлического сопротивления наибольший интерес представляет кольцевой режим течения, который наблюдается при достижении определенной скорости газа  $u_k$  на выходе из щелей (каналов для прохода газа). При кольцевом режиме течения жидкость из центральной части колонны за счет силы инерции выдавливается к периферии с образованием вращающегося газожидкостного слоя в виде конуса, а при большей скорости – цилиндра с начальным внутренним диаметром 15–20 мм. По мере роста скорости газа происходит уменьшение толщины слоя и увеличение его высоты. При достижении скорости газа равной  $u_n$  (которая также указывает на начало оголения каналов для прохода газа) наблюдается пленочный режим течения с раздельным течением газа и жидкости. При этом режиме происходит отток газовых пузырьков из жидкостного слоя и не реализуется их обновление.

Следует отметить, что размещение на внутренней цилиндрической поверхности ступени ребер или установка в верхней части ограничителей приводит

к гашению крутки потока и резко изменяет значение  $u_k$  в сторону ее увеличения.

Использование плоской осевой тарелки представленной на рис. 2, а также не представляется целесообразным из-за большого уноса и низкой крутки потока.

На основе полученного экспериментального материала зависимость для расчета критической скорости газа представлен в виде

$$u_k = C (f / F)^{-0,8} (H / D)^{0,7} (\rho_{ж} (1 - \phi) / \rho_{г}), \quad (1)$$

где коэффициент  $C = 0,007$  для плоского осевого завихрителя и  $C = 0,006$  для тангенциального завихрителя;  $F$  – площадь сечения контактной ступени;  $H$  – уровень газожидкостной смеси на ступени;  $D$  – диаметр ступени;  $\rho_{ж}$  и  $\rho_{г}$  – плотность газа и жидкости.

Уравнение (5) справедливо при  $R = (60-80)$  мм, угле наклона каналов  $30-40^\circ$  к касательной и величине  $(\mu_{ж}/\mu_{г}) = 55-78$ .

Как установлено, рис. 2, б переход из кольцевого режима в пленочный для ступени с осевым завихрителем осуществляется при  $u_k/u_n \approx 0,6$ , а тангенциальном при  $u_k/u_n \approx 0,5$ .

На основании обработки экспериментальных данных (рис. 3), была установлена зависимость для определения газосодержания на контактной ступени,

а также, что для тангенциальной тарелки  $\varphi \sim u^{-0,8}$ , для плоская  $\varphi \sim u^{-1,2}$

$$\varphi = Cu^n (\sigma / \sigma_o)^h. \quad (2)$$

#### Библиографические ссылки

1. Войнов Н. А., Кустов А. В., Николаев Н. А. Получение безводного этанола при ректификации под вакуумом // Хвойные бореальной зоны. 2012. № 3–4. С. 373–378.
2. Войнов Н. А., Николаев Н. А., Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен в вихревой ректификационной колонне // Химическая промышленность. 2008. Т. 85, № 8. С. 413–419.
3. Исследование вихревых ректификационных ступеней / А. В. Кустов, Н. А. Артищева, В. Г. Межов и др. // Химия растительного сырья. 2016. № 3. С. 125–134.
4. Вихревые контактные ступени для ректификации / Н. А. Войнов, Н. А. Николаев, А. В. Кустов и др. // Химия растительного сырья. 2008. № 3. С. 173–184.

#### References

1. Voynov N. A., Kustov A. V., Nikolaev N. A. Poluchenie bezvodnogo etanola pri rektifikatsii pod vakuumom [Preparation of anhydrous ethanol during rectification under vacuum] // Khvoynye boreal'noy zony. 2012. № 3–4. P. 373–378.
2. Voynov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A. V. Gidrodinamika i massoobmen v vikhrevoy rektifikatsionnoy kolonne [Hydrodynamics and mass transfer in a vortex distillation column] // Khimicheskaya promyshlennost'. 2008. T. 85, № 8. P. 413–419.
3. Issledovanie vikhrevykh rektifikatsionnykh stupeney. [Investigation of vortex rectification stages] / A. V. Kustov, N. A. Artishcheva, V. G. Mezhov et al. // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2016. № 3. P. 125–134.
4. Vihrevye kontaktnye stupeni dlya rektifikatsii. [Vortex contact stages for rectification.] / N. A. Voynov, N. A. Nikolaev, A. V. Kustov et al. // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2008. № 3. P. 173–184.

© Кустов А. В., Корнев В. М., 2019



УДК 621.9.02

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАЛИБРОВАНИЯ ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

П. В. Цаплин, С. П. Ереско

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: tsaplin10@mail.ru

*Рассматривается методика расчёта физических параметров термопротяжного узла для обработки поверхности древесных композиционных плит с целью достижения наиболее выгодных экономических результатов и получения наименьшей шероховатости поверхности таких плит. Приводятся необходимые требования для обработки поверхности древесных композиционных плит.*

*Ключевые слова: термосиловое воздействие, древесно-стружечные плиты, тепловая энергия, шероховатость поверхности, суммарная функциональная мощность, трение, окружная скорость.*

## THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGY OF CALIBRATION OF PARTICLE BOARDS BY THE COMBINED METHOD

P. V. Tsaplin, S. P. Eresko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tsaplin10@mail.ru

*In the article the method of calculation of the physical parameters thermoprotei site for surface treatment of wood conditioning plates in order to achieve the most favorable economic results and obtain the lowest surface roughness of such plates. Provides the necessary requirements for surface treatment of wood composite boards.*

*Keywords: thermo effect, chipboard, thermal energy, surface roughness, total functional capacity, friction, circular speed.*

В последние годы стал актуален вопрос получения древесных плитных изделий для мебельного производства с наименьшими энергозатратами, но при этом более высокого качества. Широко используемые в промышленном производстве в настоящее время шлифовальные ленты для обработки поверхности древесных плит обладают рядом недостатков. К основным можно перечислить как получение невозвратных отходов, повышенная шероховатость поверхности под ламинирование, высокая потребляемая мощность, габаритность и т. д. Предлагаемый комбинированный метод обработки поверхности древесно-стружечных плит исключает вышеперечисленные недостатки.

Главная особенность предлагаемого метода состоит в организованном резании фрезой для снятия припуска с последующим выглаживанием, за счёт сил трения термопротяжным узлом [1; 2].

Важным аспектом разработки технологии снижения шероховатости методом термосилового воздействия является составление методики расчёта динамических, кинематических и экономических характеристик такой технологии. В процессе термосилового воздействия происходит нагрев поверхности протяжного термосилового механизма от силы трения  $F_{тр}$ ,

сопровождающийся теплопроводностью трущихся тел.

Согласно закону сохранения энергии выделенное количество тепловой энергии требуется для нагрева пластины до температуры необходимой для достижения минимума шероховатости поверхности плиты. Точки, с одинаковой температурой в совокупности образуют изотермическую поверхность. Изменение температуры в теле наблюдается лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности. Резкое изменение температуры получается в направлении нормали  $n$  к изотермической поверхности. Поэтому температурное изменение плиты при термосиловом воздействии можно описать с помощью температурного градиента. Предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$  называется градиентом температуры [3]:

$$\lim \left( \frac{\delta t}{\delta n} \right) = \frac{\delta t}{dn} = \text{grad } t = vt. \quad (1)$$

Переход трения в теплоту осуществляется суммарной мощностью двигателя ( $N_{дв}$ ) в составе следующих компонентов:

$$N_{дв} = N_{водила} (N_{резания} + N_{трения}) + N_{подач} \text{ плиты} + N_{нагрев} \text{ пластины} + N_{хол. \text{ ход.}}$$

т. е.

$$N_{дв} = N_{рез} + N_{тр} + N_{под} + N_{нагр} + N_{хол. ход} \quad (2)$$

где  $N_{рез} = F_{рез} V_{окр. фрез}$ .

Сила резания  $F_{рез}$  зависит от глубины резания  $h$  м, подачи на зуб  $S$  мм/зуб, ширины фрезерования  $B$  м, число зубьев фрезы  $Z$ , диаметра фрезы  $D$  м, частоты вращения фрезы  $n$  об/мин, т. е.

$$F_{рез} = \frac{hSBZ}{Dn} \quad (3)$$

Термопротяжный узел в нашем случае совершает вращательное движение. Поэтому при расчёте потребляемой мощности необходимо учитывать линейную окружную скорость.

Линейная окружная скорость – равномерное движение по окружности с постоянной частотой вращения и в технике определяется числом оборотов в минуту, а поэтому

$$V_{окр} = \frac{2\pi RN}{60} = \frac{\pi RN}{30}, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус фрезы,  $N$  – число оборотов. Откуда,

$$N_{рез} = F_{рез} V_{окр. фрез}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность плиты.

Учитывая воздействия силы трения  $N_{тр}$  равна произведению  $F_{тр}$  на окружную линейную скорость, т. е.

$$N_{тр} = F_{тр} V_{окр} \quad (6)$$

Мощность подачи можно рассчитать, как произведение составляющих:

$$N_{под} = V_{под} (\text{const}) (F_{рез} + F_{тр}) = V_{под} (\rho h + F_{мол} + F_{деф}), \quad (7)$$

$$N_{нагр} = Q = qs, \quad (8)$$

где  $Q$  – тепловой поток;  $q$  – удельный тепловой поток;  $S$  – площадь пластины (const).

$$N_{нагр} = S dq, \quad (9)$$

$$N_{хол. ход} = I U, \quad (10)$$

где  $I$  – сила тока в цепи;  $U$  – напряжение на контакте;

$$N_{хол. ход} = U dI + I dU. \quad (11)$$

Очевидно, что в основу привода конструкции станков должны быть заложены условия, исключаящие превращение снятого припуска изделия в пыль. Заменяя шлифование направленным, организованным узлом резания, представляется возможность получать требуемые фракции отходов без абразива и с возможностью их повторного использования. Нами рассматривается способ снижения шероховатости плит при более длительной эксплуатации фрезы методом термосилового воздействия.

Принимая за основу калибровку и снижения шероховатости плит, очевидно, что силы сопротивления резания и выглаживания плиты распределены на разных концах равноплечего рычага и могут иметь разные силы сопротивления. Считая это звено звеном приведения, запишем дифференциальное уравнение второго порядка, включающего работу движущих сил и кинетическую энергию вращающегося рычага [4].

$$dA = dT. \quad (12)$$

$$M_{изб} d\varphi = d(I_{пр} \omega_1^2 / 2), \quad (13)$$

где  $M_{изб}$  – избыточный момент, равный разности приведённых моментов сил движущихся и сил сопротивления,

$$M_{изб} = M_{дв} - M_{сопр}, \quad (14)$$

или

$$(I_{пр} \omega_1^2 / 2) = M_{дв} - M_{сопр}. \quad (15)$$

Очевидно, обрабатываемый узел должен быть идеально сбалансирован, коэффициент неравномерного хода должен быть минимален и угловое ускорение стремиться к нулю, тогда уравнение движения (14) примет вид

$$\frac{dI_{пр} \omega_2}{2d\varphi} = M_{дв} - M_{сопр}. \quad (16)$$

Технология обработки ДСтП методом синтеза калибровки двухподвижной винтовой фрезой (для снятия припуска изделия) и термосилового воздействия с последующим выглаживанием термопротяжной пластиной, установленной на одной оси с фрезой, призвана называться как ресурсосберегающая. Этот метод может быть реализован на основе калибровально-термопротяжного узла, который имеет собственную угловую скорость и скорость вращения фрезы. Очевидно, в основу привода конструкций станков должны быть заложены условия, исключаящие превращения снятого припуска изделия в пыль.

В связи с этим теория и методы проектирования станков, узлов резания и формообразования обработанной поверхности являются актуальными для получения изделий строительного и мебельного назначения из древесных композиционных плит.

#### Выводы.

1. Предложен и обоснован способ обработки поверхности древесных плитных изделий методом термосилового воздействия;

2. Предложена апробированная методика расчёта энергопотребления, силовых и кинематических характеристик комбинированного способа обработки поверхности древесных плит, применение которой позволит оптимизировать конструктивно-режимные параметры станочного оборудования, реализующего предлагаемый запатентованный способ.

#### Библиографические ссылки

1. Патент РФ № 2313450 С1. Способ снижения шероховатости и разнотолщинности древесностружечных плит устройство для его осуществления / А. Г. Ермолович, К. А. Ермолович, В. В. Ромашенко; Сибирский государственный технологический университет; заявл. 29.06.2006, № 2006123154/12; опубл. в Б.И., 2007, № 36. МПК В 27М 1/02.

2. Патент РФ № 2376131. Способ фрезерования древесных материалов / А. Г. Ермолович, В. В. Ромашенко, П. В. Цаплин, П. С. Шастовский; Сибирский государственный технологический университет; заявл. 07.04.2008, № 2008113536/02 (014698); опубл. в Б.И., 2009 № 15 МПК В 27G 1/02 (2006.01).

3. Кутуков Л. Г., Зотов Г.А. Шлифовальные станки для обработки древесины. М. : Лесная. промышленность, 1983. 80 с.

4. Синайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 167 с.

#### References

1. RF patent № 2313450 C1. A method of reducing the roughness and thickness of wood chipboards device for its implementation / A. G. Ermolovich, K. A. Ermolovich, V. V. Romashenko; Siberian State Technological University ; declared 29.06.2006,

№ 2006123154/12; publ. in B.I., 2007, № 36. IPC B 27M 1/02.

2. RF patent № 2376131. Method for milling wood materials / A. G. Ermolovich, V. V. Romashenko, P. V. Tsaplin, P. S. Shastovsky; Siberian State Technological University; declaration 07.04.2008, № 2008113536/02 (014698); publ. in B.I., 2009 № 15 IPC B 27G 1/02 (2006.01).

3. Kutukov L. G., Zotov G. A. Grinding machines for wood processing. Moscow, Forest. industry, 1983. 80 p.

4. Sinailov V. A. Thermal processes during grinding and surface quality control. Moscow, Mechanical Engineering, 1978. 167 p.

© Цаплин П. В., Ереско С. П., 2019



**Секция**

**«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ  
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

УДК 539.21:537.86

## МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ И МАГНИТОИМПЕДАНС В ПАРАМАГНИТНОЙ ОБЛАСТИ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$

О. Б. Бегишева\*, О. Н. Бандурина, С. С. Аплеснин, М. Н. Ситников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: fisenko\_o@mail.ru

*Проведены исследования электрических свойств соединений с переменной валентностью  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $0 < x < 0,2$ ) в области температур 300–500 К. Построено относительное изменение магнитосопротивления от температуры для твердых растворов и относительное изменение импеданса в магнитном поле.*

*Ключевые слова: твердые растворы, магнитоимпеданс, магниторезистивный эффект.*

## MAGNETIC RESISTANCE AND MAGNETOIMPEDANCE IN THE PARAMAGNETIC AREA IN SOLID SOLUTIONS $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$

O. B. Begisheva\*, O. N. Bandurina, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: fisenko\_o@mail.ru

*The electrical properties of compounds with variable valency  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $0 < x < 0,2$ ) were studied in the temperature range 300–500 K. A relative change in magnetoresistance with temperature for solid solutions and a relative change in impedance in a magnetic field are constructed.*

*Keywords: solid solutions, magnetoimpedance, magnetoresistive effect.*

Одним из методов записи и считывания информации основывается на магниторезистивном эффекте [1; 2], который наблюдается в магнитоупорядоченных материалах. Магниторезистивный эффект существует в материалах с волной зарядовой плотности, в Пайерловских системах [4]. Разновалентное замещение в полупроводниках может также индуцировать волну зарядовой плотности [3], пиннинг которой зависит от магнитного поля и плотности дисклинаций, доменных границ. Подобная ситуация может реализоваться в твердых растворах  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ , где ион  $\text{Mn}^{2+}$  замещается  $\text{Lu}^{3+}$ .

Заряженные доменные границы определим из импедансной спектроскопии. Время релаксации носителей заряда из годографа импеданса.

Влияние магнитного поля на транспортные характеристики исследовалось на основе ВАХ, измеренных без поля и в магнитном поле  $H = 12$  кЭ. Электросопротивление, измеренное четырехзондовым методом, в интервале температур 80–400 К имеет максимум в области 260–276 К. В этой области температур исчезает поглощение на частоте  $3400 \text{ см}^{-1}$ , которая связывается с заряженной вакансией в анионной подсистеме. На рис. 1 представлено магнитосопротивление  $\Delta R = (R(H) - R(0)) / R(0)$  для двух составов  $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ . Для концентраций меньших концентрации протекания  $x_c = 0,17$  для ГЦК решетки сопротивление возрастает в магнитном поле на 5–7 % и в области температур 420–460 К. Для  $x = 0,2$  сопротивление уменьшается на 15% в магнитном поле. Это свя-

зано с образованием химического электронного фазового расслоения в области температур 400–450 К, где импеданс от температуры имеет максимум, который смещается в область высоких температур с ростом частоты. Образование фазового расслоения приводит к сжатию решетки и к росту потенциального барьера. Появление областей с разной проводимостью являются причиной роста сопротивления в магнитном поле на основе эффекта Максвелла–Вагнера. Неоднородность играет аналогичную роль в dc магнитотранспортных свойствах в неупорядоченных средах, так как здесь смешиваются Холловское сопротивление с продольными компонентами проводимости, что приводит к линейной зависимости магнетосопротивления от магнитного поля. Система электрически неоднородна с локальной электрической поляризацией, которая компенсируется свободными носителями тока и вызывает волну зарядовой плотности в образце. В магнитном поле скорость скольжения волны уменьшается и соответственно уменьшается рассеяние носителей тока на волне зарядовой плотности в  $\text{Lu}_{0,2}\text{Mn}_{0,8}\text{S}$ .

Основной вклад в импеданс обусловлен реактивной частью и зависимость импеданса от частоты обратно пропорционально частоте в интервале  $10^2$ – $10^6$  Hz. Магнитоимпеданс  $\Delta Z = (Z(H) - Z(0))/Z(0)$  от частоты представлен на рис. 2. В интервале температур 420–450 К магнитоимпеданс меняет знак при нагревании с отрицательного на положительный рис. 2, б.

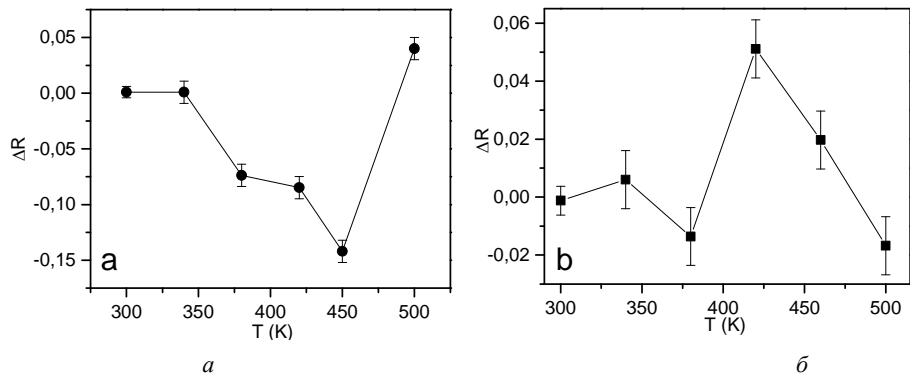


Рис. 1. Относительное изменение магнитосопротивления от температуры для твердого раствора LuMnS для концентрации  $x = 0,1$  (а) при напряжении  $U = 195V$  и для концентрации  $x = 0,2$  (б) при напряжении  $U = 100-195V$ .

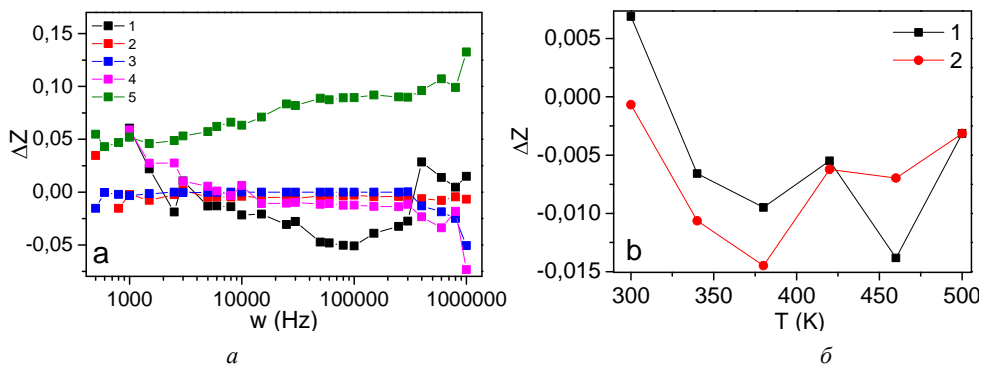


Рис. 2. Относительное изменение импеданса в магнитном поле от частоты (а) для  $x = 0,2$  при температуре  $T = 300(1), 340(2), 380(3), 420(4), 460(5)$ . Изменение магнитоимпеданса  $dZ$  для концентрации  $x = 0,1$  для частот  $\omega = 1 \text{ kHz}(1)$  и  $\omega = 10 \text{ kHz}(2)$ .

Годограф импеданса описывается в модели эквивалентных схем с колебательным контуром, состоящим из сопротивления и емкости, где емкость обусловлена нанокластерами LuS. В области высоких частот добавляется линейный вклад в импеданс для  $x = 0,2$ . Этот элемент моделирует импеданс линейного диффузионного процесса, протекающего в однородном слое с конечной толщиной. Импеданс при этом процессе зависит от сопротивления, коэффициента диффузии частиц и толщины диффузионного слоя Нернста. При высоких частотах экспериментальные данные хорошо аппроксимируются линейной диаграммой импеданса Варбурга. Выше 420 К диффузионный вклад исчезает. Диффузионный вклад приводит к уменьшению импеданса в магнитном поле.

Для концентраций  $X < X_c$  найден гистерезис электрической поляризации, остаточная поляризация, которая исчезает при  $T > 280 \text{ K}$ . Поляризация связана с накоплением заряда на интерфейсе Lu-S. Гистерезис поляризации зависит от внешнего магнитного поля.

#### Библиографические ссылки

1. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в  $Gd_xMn_{1-x}S$  // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 104.
2. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Yanushkevich K. I. Magnetoresistance effect in anion-substituted manganese chalcogenides // *Physica status solidi b*. 2015. Vol. 252, № 8. P. 1792–1798.

3. Magnetoelectric and magnetoresistive properties of the  $Ce_xMn_{1-x}S$  semiconductors / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, O. B. Romanova, A. Yu. Pichugin // *Physica Status Solidi B*. 2016. Vol. 253, № 9. P. 1771–1781.

4. Nd<sub>0.5</sub>Bi<sub>2.5</sub>Fe<sub>5-y</sub>Ga<sub>y</sub>O<sub>12</sub> thin films on Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> substrates prepared by metal-organic decomposition / M. Sasaki, G. Lou, Q. Liu et al // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016. Vol. 55. P. 055501.

#### References

1. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnitotransportnye efekty v paramagnitnom sostoyanii v  $Gd_xMn_{1-x}S$ ] // *Pis'ma v ZhETF*. 2014. T. 100. S. 104.
2. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Yanushkevich K. I. [Magnetoresistance effect in anion-substituted manganese chalcogenides]. *Physica status solidi b*. 2015. Vol. 252, № 8. P. 1792–1798.
3. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Romanova O. B., Pichugin A. Yu. [Magnetoelectric and magnetoresistive properties of the  $Ce_xMn_{1-x}S$  semiconductors]. *Physica Status Solidi B*. 2016. Vol. 253, № 9. P. 1771–1781.
4. Sasaki M., Lou G., Liu Q., et al [Nd<sub>0.5</sub>Bi<sub>2.5</sub>Fe<sub>5-y</sub>Ga<sub>y</sub>O<sub>12</sub> thin films on Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> substrates prepared by metal-organic decomposition] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 55. P. 055501.

© Бегишева О. Б., Бандурина О. Н., Аплеснин С. С., Ситников М. Н., 2019

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ РЕШЕТОЧНЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ГИБРИДНЫХ ПЛАЗМОННО-ФОТОННЫХ НАНОСТРУКТУРАХ\*

В. С. Герасимов<sup>1,2,5</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,2,5</sup>, Р. Г. Бикбаев<sup>2,4\*</sup>, И. Л. Рассказов<sup>3</sup>, С. В. Карпов<sup>2,4,5</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/44

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup>Институт оптики, Рочестерский университет, США  
14627, штат Нью-Йорк, Рочестер, бульвар Джозефа Уилсона, 500

<sup>4</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

<sup>5</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: bikbaev@iph.krasn.ru

*Исследовано проявление аномалий Рэлея в гибридной структуре, состоящей из периодической решетки алюминиевых нанодисков, размещенной внутри дефектного слоя одномерного фотонного кристалла.*

*Ключевые слова: фотонный кристалл, аномалия Рэлея, связанные моды, плазмоника, наночастицы.*

## SURFACE LATTICE RESONANCES IN HYBRID PLASMON-PHOTONIC NANOSTRUCTURES

V. S. Gerasimov<sup>1,2,5</sup>, A. E. Ershov<sup>1,2,5</sup>, R. G. Bikbaev<sup>2,4\*</sup>, I. L. Rasskazov<sup>3</sup>, S. V. Karpov<sup>2,4,5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>The Institute of Optics, University of Rochester  
Rochester, NY 14627, USA, 500, Joseph Wilson Blvd

<sup>4</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS  
50/38, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>5</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: bikbaev@iph.krasn.ru

*The manifestation of Rayleigh anomalies in a hybrid structure consisting of a periodic lattice of aluminum nanodiscs placed inside a defective layer of a one-dimensional photonic crystal is studied.*

*Keywords: photonic crystal, Rayleigh anomaly, mode coupling, plasmonics, nanoparticle.*

В последние годы большой интерес вызывают периодические массивы плазмонных наночастиц, обусловленный возникновением коллективных мод вследствие сильной связи между локализованным поверхностным плазмонным резонансом (ЛППР) и аномалиями Вуда–Рэлея [1]. Это приводит к появлению узкополосных поверхностных решетчатых резонансов (ППР) [2], добротность которых значительно превосходит добротность других типов локализованных состояний, реализуемых в плазмонных средах. В данной работе исследуется гибридная наноструктура,

состоящая из одномерного фотонного кристалла (ФК) с дефектным слоем с внедренной в неё двумерной периодической решеткой алюминиевых нанодисков.

Такие структуры могут быть использованы в качестве оптических сенсоров, наноантенн и в других актуальных приложениях, перспективных для применения в системах управления космических аппаратов. Нами представлена аналитическая модель для прогнозирования спектрального положения аномалий Рэлея в подобных гибридных плазмонно-фотонных структурах.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-240013, гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (соглашение 075-15-2019-676).

Элементарная ячейка ФК состоит из двух слоев: двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с толщиной  $d_a = 70$  нм и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,1$  и двуокиси циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) с толщиной  $d_b = 40$  нм и  $\varepsilon_b = 4.16$ . Будем использовать ФК, состоящий из шести элементарных ячеек и дефектного слоя между ними (с толщиной  $L = 725$  нм и  $\varepsilon_{\text{def}} = 2,25$ ). Двумерный массив алюминиевых нанодисков высотой  $H = 30$  нм и радиусом  $R = 25$  нм с периодом  $h$ , внедрен в центр дефектного слоя ФК. Оптические свойства описанных структур были рассчитаны методом конечных разностей во временной области (FDTD) (см. рисунок).

В случае массива НЧ, встроенного в дефектный слой ФК, аномалии Рэля возникают из-за многократных отражений света, рассеянного НЧ в ФК. В общем случае волновой вектор  $k$  в дефектном слое определяется выражением

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \varepsilon_{\text{def}} \left( \frac{2\pi}{\lambda_{p,q,s}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $k_{x,y,z}$  – соответствующие компоненты волнового вектора. Условия конструктивной интерференции для ФК с НЧ, встроенным в середину его дефектного слоя, можно найти из

$$\begin{aligned} k_x h &= 2\pi p, \\ k_y h &= 2\pi q, \\ k_z L &= 2\pi s - \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $s$  – число которое обозначает порядок разности фаз в направлении  $z$ . Уравнение (2) учитывает связь НЧ через множественные отражения от ФК. Следует отметить, что для  $L \rightarrow \infty$  связь между НЧ и ФК становится незначительной,  $k_z$  стремится к нулю в уравнении (1) и (2). Уравнение (2) учитывает фазовый сдвиг  $\varphi$ , возникающий из-за отражения от ФК [3]:

$$\varphi = \arg \left[ \frac{CU_{N-1}}{AU_{N-1} - U_{N-2}} \right]. \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} U_N &= \sin[(N+1)K\Lambda] / \sin[K\Lambda], \\ K &= \arccos[(A+D)/2] / \Lambda - \end{aligned}$$

Блоховское волновое число,  $\Lambda = d_a + d_b$  и  $N$  – число периодов ФК.  $A$ ,  $C$  и  $D$  – элементы  $2 \times 2$  комплексной матрицы, которая связывает амплитуды плоских волн в слое 1 элементарной ячейки с соответствующими амплитудами для эквивалентного слоя в следующей элементарной ячейке ФК. Хотя мы предполагаем, что линейно поляризованное внешнее излучение падает нормально на поверхность ФК, свет, рассеянный НЧ, в общем случае имеет не нулевые  $k_x$  и  $k_y$ . В этой работе мы обозначаем поляризацию ТЕ как перпендикулярную плоскости падения, в то время как ТМ параллельна ей. Таким образом, матрица  $ABCD$  имеет вид

$$M_{ABCD} = \begin{bmatrix} e^{ik_{az}d_a} \left( \cos k_{bz}d_b + \frac{1}{2}i\aleph_+ \sin k_{bz}d_b \right) \\ e^{-ik_{az}d_a} \left( \frac{1}{2}i\aleph_- \sin k_{bz}d_b \right) \\ e^{ik_{az}d_a} \left( -\frac{1}{2}i\aleph_- \sin k_{bz}d_b \right) \\ e^{-ik_{az}d_a} \left( \cos k_{bz}d_b - \frac{1}{2}i\aleph_+ \sin k_{bz}d_b \right) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

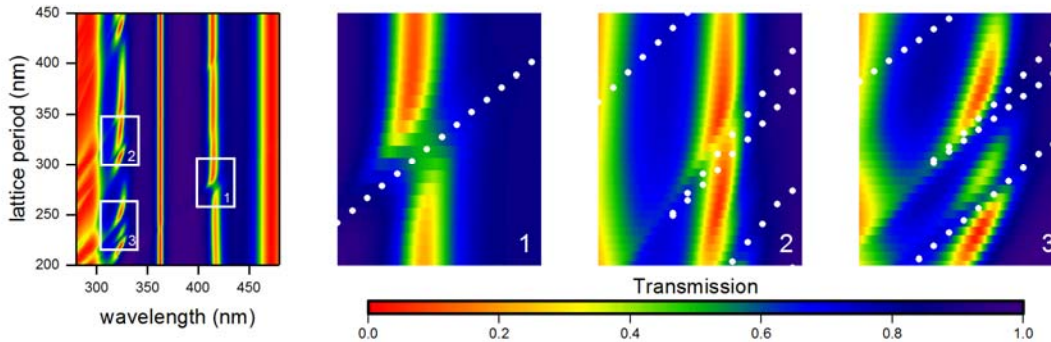
Здесь  $\aleph_{\pm} = \frac{k_{bz}}{k_{az}} \pm \frac{k_{az}}{k_{bz}}$  для ТЕ  $\aleph_{\pm} = \frac{\varepsilon_b k_{az}}{\varepsilon_a k_{bz}} \pm \frac{\varepsilon_a k_{bz}}{\varepsilon_b k_{az}}$  для

ТМ моды

$$\begin{aligned} k_{az} &= \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{\text{def}}} k_z^2 + \left( \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{\text{def}}} - 1 \right) k_x^2 + \left( \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{\text{def}}} - 1 \right) k_y^2}, \\ k_{bz} &= \sqrt{\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{\text{def}}} k_z^2 + \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{\text{def}}} - 1 \right) k_x^2 + \left( \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{\text{def}}} - 1 \right) k_y^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

являются волновыми векторами для соответствующих слоев ФК. Численное решение уравнения (1) для данной конфигурации ФК и массива алюминиевых НЧ изображено на рисунке. Следует отметить, что решения уравнения (1) симметричны относительно следующих перестановок и преобразований:  $p \leftrightarrow q$ ,  $p \rightarrow -p$  и  $q \rightarrow -q$ .

Таким образом, для удобства и без потери общности рассмотрим  $q \geq p \geq 0$ . Из-за симметрии системы мы ограничиваем обсуждение неотрицательными значениями  $k_z$  и  $s$ .



Спектры пропускания исследуемой структуры для разных значений периода решетки  $h$ . Белыми точками показаны положения аномалий Рэля



Наконец, следует отметить, что моды с волновым вектором, параллельным 2D-массиву (т. е. с  $k_z = 0$ ) и наблюдаемые в исходном массиве НЧ, также сохраняются в присутствии ФК.

По рисунку видно, что множественные расщепления дефектных мод ФК возникают для разных  $h$  только для нечетных мод. При этом четная мода остается неизменной. Кроме того, на рисунке показаны положения как обычных аномалий Рэля (вставка 1), так и дополнительных аномалий (вставки 2, 3), которые проявляются вследствие взаимодействия наночастиц в решетке друг с другом посредством отражений от слоев ФК. Предложенные в работе метаматериалы могут стать элементной базой для фотонных устройств, которые в свою очередь могут быть использованы в таких крупных и высокотехнологических предприятиях как НПО ИСС и АО «Красмаш».

## References

1. Rayleigh L. On the Dynamical Theory of Gratings // Proceedings of the Royal Society A: mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1907. Vol. 79, № 532. P. 399–416.
2. Markel V. A. Divergence of dipole sums and the nature of non-Lorentzian exponentially narrow resonances in onedimensional periodic arrays of nanospheres // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical physics. 2005. Vol. 38, № 7. P. L115–L121.
3. Yeh P., Yariv Amnon, Hong ChiShain Electromagnetic propagation in periodic stratified media i general theory // Journal of the Optical Society of America. 1977. Vol. 67, № 4. P. 423.

© Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г.,  
Рассказов И. Л., Карпов С. В., 2019

УДК 535.015

## ГИБРИДНЫЕ МОДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ ИЗ АЛЮМИНИЯ\*

В. С. Герасимов<sup>1,2,5\*</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,2,5</sup>, Р. Г. Бикбаев<sup>2,4</sup>, И. Л. Рассказов<sup>3</sup>, С. В. Карпов<sup>2,4,5</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/44

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup>Институт оптики, Рочестерский университет, США  
14627, штат Нью-Йорк, Рочестер, бульвар. Джозефа Уилсона, 500

<sup>4</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

<sup>5</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: gerasimov@icm.krasn.ru

*Исследованы гибридные моды, образованные в результате взаимодействия мод двумерной решетки с локальными модами отдельных частиц, показана возможность применения обобщённой теории Ми для исследования таких мод.*

*Ключевые слова: аномалия Рэлея, связанные моды, плазмоники, наночастицы.*

## HYBRID ELECTROMAGNETIC FIELD MODES IN PERIODIC ALUMINIUM NANOSTRUCTURES

V. S. Gerasimov<sup>1,2,5\*</sup>, A. E. Ershov<sup>1,2,5</sup>, R. G. Bikbaev<sup>2,4</sup>, I. L. Rasskazov<sup>3</sup>, S. V. Karpov<sup>2,4,5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>The Institute of Optics, University of Rochester  
Rochester, NY 14627, USA, 500, Joseph Wilson Blvd

<sup>4</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS  
50/38, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>5</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: gerasimov@icm.krasn.ru

*Hybrid modes formed as the result of interaction of two-dimensional lattice modes with local modes of isolated nanoparticles are investigated, the possibility of application of the generalized Mie theory for the study of such modes is shown.*

*Keywords: Rayleigh anomaly, mode coupling, plasmonics, nanoparticle.*

Развитие современной техники и технологии способствует формированию совершенно новых отраслей науки, направленных на разработку материалов, альтернативных полупроводниковым. Одним из таких направлений в оптике является фотоника, предусматривающая создание принципиально новых сред передачи и обработки информации, в которых, в отличие от полупроводниковой электроники, носителем информации является фотон, а не электрон. Особый интерес в последнее время в данной области представляют периодические структуры, состоящие из малых

частиц различной формы. Такие частицы, помещенные в упорядоченную структуру, проявляют уникальные оптические свойства, отличные от свойств изолированных частиц.

Разработка новых оптических материалов на основе периодических структур является актуальной прикладной задачей, в том числе и для разработки перспективных элементов спутниковых систем, систем управления, телеметрии, нелинейных оптических элементов, лазеров, разнообразных сенсоров и т. д.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-240013, гранта Президента РФ, соглашение № 075-15-2019-676.

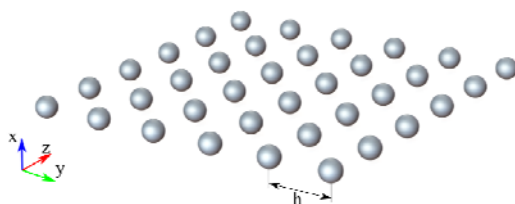
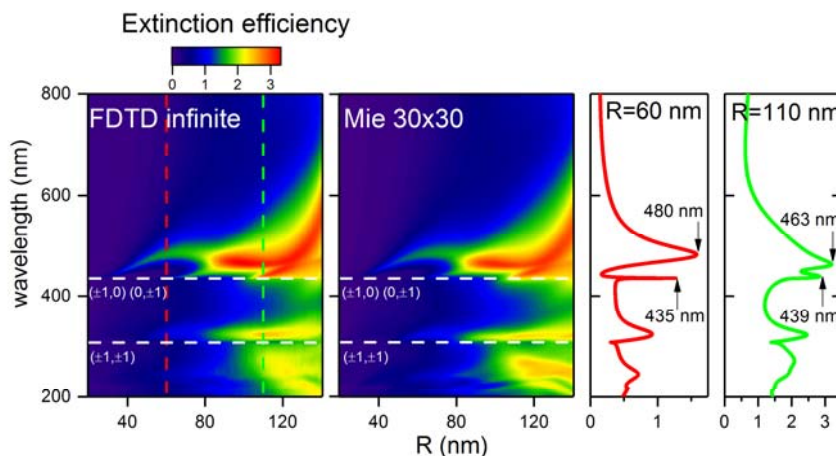


Рис. 1. Спектры пропускания исследуемой структуры

Рис. 2. Спектры экстинкции бесконечных (слева) и  $30 \times 30$  (справа) массивов алюминиевых наночастиц с  $H = 290$  нм; для разных значений радиуса наночастиц, вычисленных с помощью метода FDTD и обобщенной теории Ми, соответственно. Белая пунктирная линия представляет различные порядки аномалий Рэлея

В одиночных изолированных наночастицах под действием внешнего оптического излучения могут возбуждаться моды электромагнитного поля различных порядков. Например, для сферических частиц модами первого порядка являются электро- и магнитодипольные моды. Возбуждение мод более высоких порядков (например, электрических и магнитных квадрупольных и октупольных) достигается как за счет изменения геометрических размеров частиц, так и управления формой волнового фронта, падающего на неё. В случае расположения частиц в упорядоченной структуре взаимодействие локальных мод каждой отдельной частицы с коллективными модами всей структуры могут приводить к проявлению коллективного резонанса, впервые описанного Рэлеем и Вудом [1; 2]. Несмотря на огромное обилие работ, посвященных исследованию двумерных решеток, возбуждение мод высших порядков (квадрупольные, октупольные) в наночастицах, связанное с рассеянным на решетке падающим излучением, не изучено. Не изучена и гибридизация этих мод с модами самой решетки. В связи с этим, целью настоящего проекта является исследование эффектов гибридизации собственных мод высших порядков частицы с модами двумерной решетки.

В работе исследовались периодические решетки из алюминиевых наносфер, помещенных в диэлектрическую матрицу с показателем преломления 1,5. Схематическое изображение структуры представлено на (рис. 1).

Для анализа сложной спектральной картины мы воспользуемся обобщенной теорией Ми, которая позволит нам получить разложение спектров экстинк-

ции по модам сферических частиц. Необходимо отметить, что обобщенная теория Ми позволяет рассчитывать оптические свойства структур, состоящих из ограниченного числа частиц. В этом случае, спектры экстинкции двумерной решетки могут быть искажены за счет граничных эффектов. Поэтому нами были проведены сравнительные расчеты спектров экстинкции бесконечной периодической решетки и решетки, состоящей из  $30 \times 30$  частиц.

Результаты расчета изображены на рис. 2, где видно, что использование массива частиц  $30 \times 30$  с высокой степенью точности воспроизводит спектральные характеристики бесконечной решетки. Важно отметить, что хорошее согласие наблюдается не только по длинам волн мод двумерной решетки, но и по их амплитудам. Таким образом, мы можем использовать обобщенную теорию Ми для разложения мод двумерной решетки по сферическим гармоникам минимизировав на них влияние граничных эффектов.

### References

1. Rayleigh L. On the Dynamical Theory of Gratings // Proceedings of the Royal Society A: mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1907. Vol. 79, № 532. P. 399–416.
2. Markel V. A. Divergence of dipole sums and the nature of non-Lorentzian exponentially narrow resonances in onedimensional periodic arrays of nanospheres // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical physics. 2005. Vol. 38, № 7. P. L115–L121.

© Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г.,  
Рассказов И. Л., Карпов С. В., 2019

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОБАВОК В КОМПОЗИЦИОННОМ СЛОЕ РАДИАЦИОННОГО ЭКРАНА

Е. Г. Даниленко\*, А. Е. Никитина, А. А. Сафронова, С. В. Телегин

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

*Рассматривается влияние функциональных добавок на коэффициент теплопроводности и ослабление бета-излучения первого слоя радиационного экрана.*

*Ключевые слова: радиационная защита, композитный материал, теплопроводность, бета-излучение.*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF FUNCTIONAL ADDITIVES IN THE COMPOSITION LAYER OF THE RADIATION SCREEN

E. G. Danilenko\*, A. E. Nikitina, A. A. Safronova, S. V. Telegin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: evg.danilenko@mail.ru

*In this paper we have considered the effect of functional additives on the coefficient of thermal conductivity and attenuation of beta radiation of the first layer of the radiation screen.*

*Keywords: radiation protection, composite material, conductance, beta radiation.*

Воздействие ионизирующих излучений может приводить к изменению физических свойств и структуры материалов. По степени стойкости в порядке убывания материалы располагаются – металлы, керамика, полимеры и резина.

На работу бортовой аппаратуры космического аппарата влияют многочисленные факторы. Одним из них является воздействие бета-излучения космической среды [1; 2], вызывающее различные радиационные эффекты, в том числе и радиационный разогрев, который в материалах с низкой теплопроводностью может локально достигать нескольких сотен градусов.

Повысить надежность электронных устройств и увеличить срок активного существования космических аппаратов позволяют радиационно-защитные экраны.

Конструкция разрабатываемой защиты представляет собой слоистую структуру, где первый слой от источника излучений выполнен из композиции эпоксидной смолы с карбидом бора и является диэлектриком, последующие слои – металлические.

Для того чтобы увеличить теплопроводность материала первого слоя предлагается ввести в его композицию функциональную добавку. Материал функциональной добавки должен обладать высокой теплопроводностью и не ухудшать свойства, ослабляющие ионизирующее излучение.

Исследованию подвергались образцы в виде тонких пластин размером 70×70×0,6 мм из эпоксидной смолы ЭД-20 (50 вес, %) и смеси карбида бора ( $B_4C$ ) с функциональными добавками из графита или алюминиевой пудры (50 вес. %).

Эпоксидная смола ЭД-20 представляет собой синтетический материал, которому присущи свойства олигомерных соединений, и относится к классу эпоксидно-диановых двухкомпонентных смол. Эпоксидная смола ЭД-20 может выдерживать температуру от  $-50$  до  $+170$  °С, плотность  $1,18$  г/см<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности эпоксидной смолы  $\lambda = 0,02-3,0$  Вт/(м·К) [3; 4].

Карбид бора является химическим веществом с плотностью  $2,52$  г/см<sup>3</sup>. Чтобы разложить данный материал необходимо нагреть его до температуры в  $2450$  °С. По твердости он уступает только алмазу и кубическому нитриду бора. Теплопроводность карбида бора при  $300$  К составляет  $121$  Вт/(м·К) [5]. В исследованиях использовалась фракция F230 содержащая частицы размером от  $12$  до  $18$  мкм.

Графит марки МПГ-6 с плотностью в заготовке  $1,75$  г/см<sup>3</sup> получен из стержня нагревательного элемента путем протачивания на токарном станке, его достоинством являются мелкозернистость и высокая теплопроводность  $278,4-2435$  Вт/(м·К).

В алюминиевой пудре марки ПАП-1 частицы имеют пластинчатую форму, средняя толщина пластинок  $0,25-0,5$  мкм, а средний линейный размер около  $20-30$  мкм, плотность частиц находится в диапазоне от  $0,15$  до  $0,6$  г/см<sup>3</sup>.

Образцы изготавливались по стандартной технологии для клеев, соотношение эпоксидной смолы и отвердителя  $10:1$ . С целью уменьшения вязкости в состав добавлялся ацетон как пластификатор до  $10$  вес, %. Для удаления воздушных пузырей, возникающих при смешивании компонентов в течении

15 мин, готовая смесь помещалась в сушильный вакуумный шкаф на 30 мин при температуре 50 °С и давлении – 1 кг/см<sup>2</sup>. Затем смесь наносилась между пластин и сдавливалась прессом для получения образцов требуемой толщины. Полная полимеризация образцов занимает 24 часа.

Измерения эффективной теплопроводности проводились при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076–99 [6]. Для более точного сравнения результатов эффективная теплопроводность пересчита-

на в коэффициент теплопроводности. Результаты представлены на рис. 1.

Измерения по определению коэффициента пропускания проводились при одинаковом воздействии ионизирующего излучения StY изотопа, счетчик Гейгера-Мюллера располагался на расстоянии 30 мм, время измерения 20 секунд, количество измерений 20.

Средняя величина интенсивности источника за время измерения равна 19114.1 имп с точностью 2 %. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

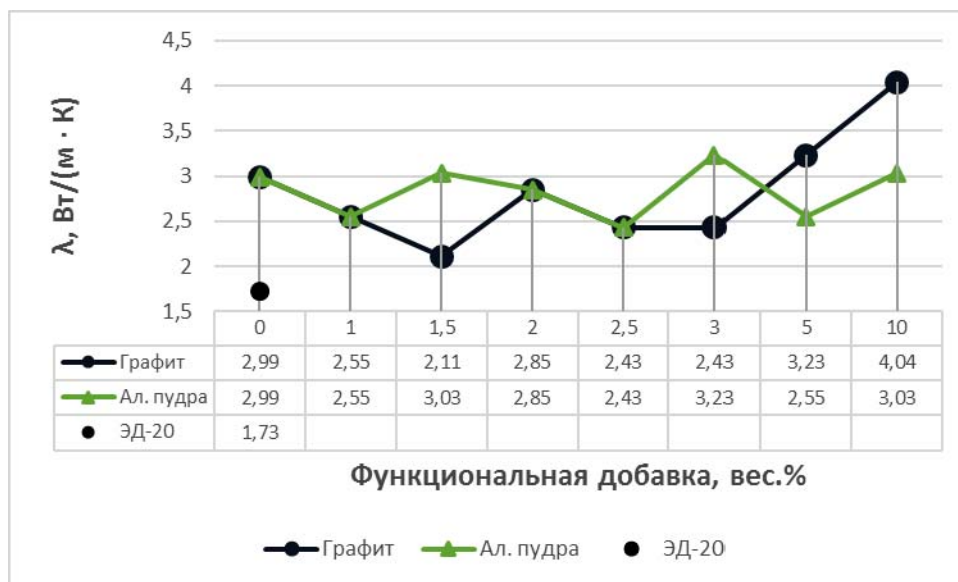


Рис. 1. Зависимость удельной теплопроводности от весового содержания функциональных добавок

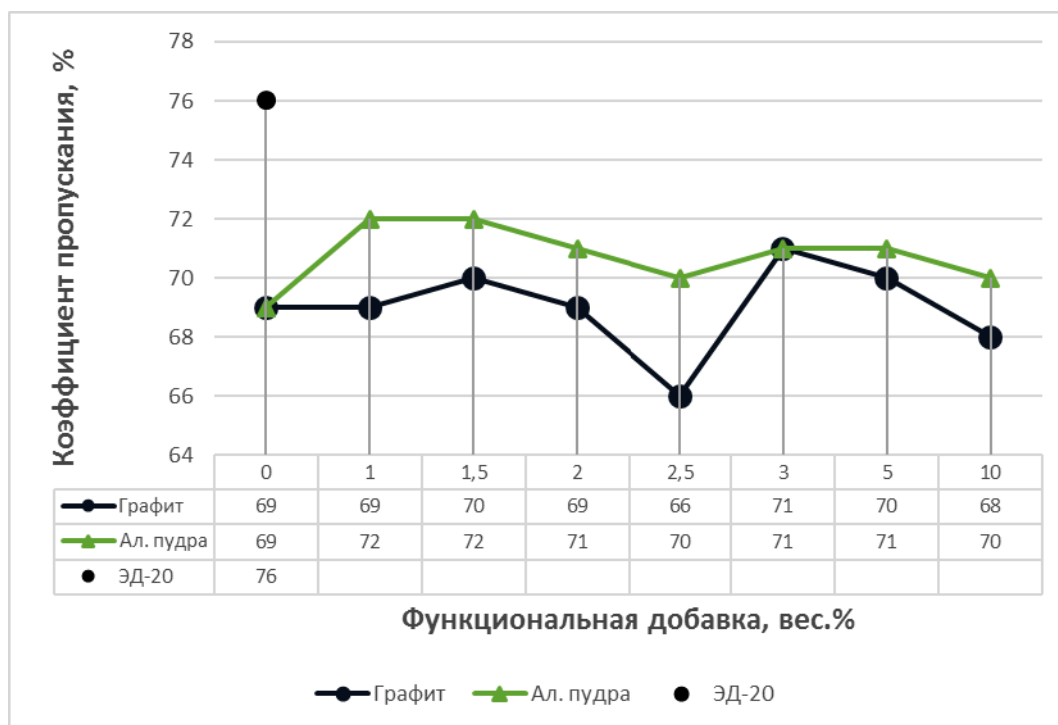


Рис. 2. Диаграмма зависимости значения коэффициента пропускания от весового содержания функциональных добавок

Анализируя диаграмму на рис. 1, можно сделать следующие выводы:

– введение в эпоксидную смолу карбида бора повышает коэффициент теплопроводности композита с 1,73 Вт/(м·К) до 2,99 Вт/(м·К);

– зависимость теплопроводности от количества функциональной добавки имеет сложный вид с наличием минимумов и максимумов, этот факт может косвенно свидетельствовать об образовании субструктуры в композите, что требует проведения дополнительных морфологических исследований;

– как функциональную добавку для увеличения теплопроводности до 3 вес, % предпочтительнее применять алюминиевую пудру, от 3 до 10 вес, % – графит.

Исследование зависимости коэффициента пропускания от количества функциональной добавки (рис. 2) однозначно показывает преимущество графита во всем рассматриваемом интервале, а введение карбида бора в эпоксидную смолу увеличивает защитные свойства композиции на 7 %.

Сопоставляя данные (рис. 1 и 2) можно сказать, что в тех точках, где коэффициент теплопроводности увеличивается, коэффициент пропускания ухудшается. Наибольший интерес для дальнейшего исследования представляет диапазон функциональной добавки от 1,5 до 3 вес, % и, поскольку, радиационный экран является многослойным, следует изучать его двухслойную конструкцию.

#### Библиографические ссылки

1. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений : справочник. М. : Энергоатомиздат, 1995. 496 с.

2. Беспалов В. И. Лекции по радиационной защите : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 508 с.

3. Теплопроводность твердых тел : справочник / А. С. Охотин, Р. П. Боровикова и др. М. : Энергоатомиздат, 1984. 320 с.

4. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

5. Пилянкевич А. Н., Кнунянц И. Л. Бора карбиды. Химическая энциклопедия // Советская энциклопедия. 1988. 623 с.

6. ГОСТ 7076–99. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Введ. 1999–20–05. М. : Изд-во стандартов, 1999. 13 с.

#### References

1. Mashkovich V. P., Kudryavceva A. V. *Zashhita ot ionizirujushhijh izluchenij : Spravochnik* [Protection against ionizing radiation: Reference book]. Moscow, Jelektroatomizdat, 1995. 496 p.

2. Беспалов В. И. *Lekcii po radiacionnoj zashhite : uchebnoe posobie* [Lectures on radiation protection: a training manual]. Tomsk : Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2012. 508 p.

3. *Teploprovodnost' tverdyh tel. Spravochnik* [Thermal conductivity of solids. Reference book] / A. S. Ohotin, R. P. Borovikova et al. Moscow, Jelektroatomizdat, 1984. 320 p.

4. *Fizicheskie velichiny : Spravochnik / Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlilova* [Physical quantities. Reference book]. Moscow, Jelektroatomizdat, 1991. 1232 p.

5. Piljankevich A. N., Knunjanc I. L. *Bora karbidy. Himicheskaja jenciklopedija // Sovetskaja jenciklopedija*. 1988. 623 p.

6. *GOST 7076–99. Metod opredelenija teploprovodnosti i termicheskogo soprotivlenija pri stacionarnom teplovom rezhime* [State Standard 7076–99. Method for determination of thermal conductivity and thermal resistance under stationary thermal conditions]. Moscow, Standards Publishing House, 1999. 13 p.

© Даниленко Е. Г., Никитина А. Е., Сафронова А. А., Телегин С. В., 2019

УДК 535.8; 544.77.03

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ФОТОМОДИФИКАЦИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ\*

А. Е. Ершов<sup>1,2,3\*</sup>, В. С. Герасимов<sup>1,2,3</sup>, А. П. Гаврилюк<sup>1,3</sup>, С. В. Карпов<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

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

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет

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

<sup>4</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок. 50/38

\*E-mail: alexander.ershov@icm.krasn.ru

*Исследуются динамические фотохромные процессы в многочастичных агрегатах плазмонно-резонансных наночастиц. Эти нелинейные процессы могут использоваться в качестве основы для быстродействующих фотонных элементов, лимитеров в перспективных оптических интегральных микросхемах, в том числе в сложных спутниковых системах.*

*Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, коллоидные агрегаты*

## DYNAMIC PHOTOMODIFICATION OF DISORDERED AGGREGATES OF PLASMONIC NANOPARTICLES

A. E. Ershov<sup>1,2,3\*</sup>, V. S. Gerasimov<sup>1,2,3</sup>, A. P. Gavriilyuk<sup>1,3</sup>, S. V. Karpov<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>4</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS  
50/38, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

\*E-mail: alexander.ershov@icm.krasn.ru

*Dynamic photochromic processes in multiparticle aggregates of plasmon resonance nanoparticles are investigated. These nonlinear processes can be used as a basis for high-speed photonic elements, limiters in prospective optical integrated circuits, including in complex satellite systems.*

*Keywords: surface plasmon resonance, colloidal aggregates.*

Агрегаты плазмонных наночастиц с локально анизотропной неупорядоченной структурой проявляют эффект гигантского усиления локального электромагнитного поля вблизи частиц, входящих в резонансные внешнему оптическому полю домены.

Появление высокодобротных оптических резонансов наночастиц связано с возбуждением поверхностных плазмонов, а само усиление наблюдается в области неоднородно уширенной полосы плазмонного поглощения агрегата. Это свойство является причиной проявления в средах, содержащих такие агрегаты нелинейных процессов фотомодификации. При этом

можно выделить 2 режима – динамический и статический. Первый связан с быстрым изменением оптических свойств частиц агрегатов под действием лазерного излучения, в статическом режиме изменение оптических свойств среды связано с необратимым изменением структуры агрегатов. В настоящей работе исследуется динамический режим фотомодификации.

Фотохромный эффект в средах, содержащих такие плазмонные агрегаты, был впервые обнаружен в [1] и более детально экспериментально исследован в работах [2; 3].

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-243023, гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (соглашение 075-15-2019-676).

Фотохромный эффект проявляется в случае попадания частоты лазерного излучения в полосу плазмонного поглощения агрегатов и при превышении энергетического порога. За десятилетия, прошедшие с начала исследований в данной области накоплен большой объем экспериментальных данных и выявленных закономерностей по воздействию импульсного лазерного излучения на такие материалы, который не получил должного объяснения в силу сложности и взаимосвязанности сопутствующих процессов.

Ранее нами была разработана аналитическая модель, описывающая процесс фотомодификации и учитывающая ряд взаимосвязанных термодинамических, оптических, физико-химических, механических процессов [4] и воспроизводит наиболее реалистичную картину воздействия импульсного лазерного излучения на агрегат. Модель была реализована в виде программного пакета на языке C++.

Для выполнения расчетов был использован набор из 2000 агрегатов, полученных методом броуновской динамики [5], которые воспроизводят структуру естественных коллоидных агрегатов с фрактальной геометрией. Один из этих агрегатов показан на рис. 1.

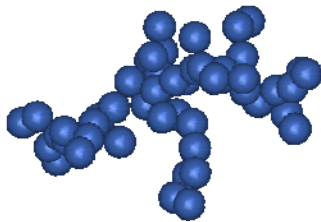


Рис. 1. Изображение одного из исследуемых агрегатов число частиц  $N = 50$

На рис. 2 представлены разностные спектры экстинкции многочастичных монодисперсных агрегатов серебряных наночастиц на момент окончания импульса длительностью 20 пс, что соответствует режиму динамической фотомодификации.

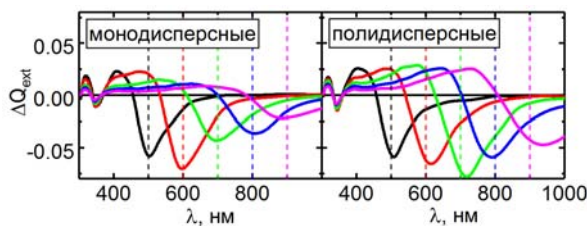


Рис. 2. Разностные спектры (разность спектров до и после облучения) экстинкции, усредненные по набору из 2000 агрегатов. Длительность лазерного импульса 20 пс, интенсивность лазерного излучения  $2,4 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>

Электродинамические расчеты выполнялись в соответствие с методикой, изложенной в работе [6] усреднением по коэффициентам пересечения от 1.2 до 1.4. По рисунку видно, что в разностном спектре отсутствует спектральный «горб» с длинноволновой стороны провала, что в значительной степени определяет знак нелинейной добавки к показателю преломления среды. В пикосекундных импульсах частицы в резонансных доменах не успевают изменить свое положение под действием сил Ван-дер-Ваальса в условиях снижения модуля упругости адсорбционного слоя частиц. Основным механизмом модификации в этом режиме является нагрев частиц и изменение их резонансных свойств.

Появление такой спектральной особенности приводит к проявлению в средах, содержащих фрактальные агрегаты плазмонно-резонансных наночастиц, нелинейной рефракции и как следствие к самофокусировке или дефокусировке лазерного пучка. Исследование нелинейно рефракции в таких средах будет являться предметом дальнейшего исследования нашей группы по данной направлению.

## References

1. Observation of a wavelength- and polarization-selective photomodification of silver clusters / S. V. Karpov, A. K. Popov, S. G. Rautian et al. // JETP Lett. 1988. Vol. 48, № 10. P. 571–573.
2. Spectral dependence of selective photomodification in fractal aggregates of colloidal particles / V. P. Safonov, V. M. Shalaev, V. A. Markel et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80, № 5. P. 1102–1105.
3. Karpov S. V., Popov A. K., Slabko V. V. Photochromic reactions in silver nanocomposites with a fractal structure and their comparative characteristics // Technical Phys. 2003. Vol. 48, № 6. P. 749–756.
4. Optodynamic phenomena in aggregates of polydisperse plasmonic nanoparticles / A. E. Ershov, A. P. Gavrilyuk, S. V. Karpov, P. N. Semina // Applied Physics B. 2014. Vol. 115, № 4. P. 547–560.
5. Simulation of the growth of nanoparticle aggregates reproducing their natural structure in disperse systems / S. V. Karpov, V. S. Gerasimov, I. L. Isaev, A. V. Obushchenko // Colloid Journal. 2006. Vol. 68, № 4. P. 441–450.
6. Effects of size polydispersity on the extinction spectra of colloidal nanoparticle aggregates / A. E. Ershov, I. L. Isaev, P. N. Semina et al. // Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85. P. 045421.

© Ершов А. Е., Герасимов В. С.,  
Гаврилюк А. П., Карпов С. В., 2019



## ПРИМЕНЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДАТЧИКОВ С ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

К. В. Заичко<sup>1,2</sup>, Д. В. Ивленков<sup>1</sup>, С. А. Ильвудииков<sup>1</sup>, С. Н. Шарангович<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40  
E-mail: zaichkokv@gmail.com

*Представлены результаты встраивания оптического волокна с решетками Брэгга в многослойную печатную плату. Экспериментальные исследования показали, что встраивание волокна с «преднапрягом» дает наиболее точные результаты измерения температуры, что в свою очередь является важным критерием при разработке космических аппаратов.*

*Ключевые слова: оптическое волокно; волоконно-оптические датчики; многослойная печатная плата; температурное воздействие.*

## APPLICATION OF POINT SENSORS WITH FIBER BRAGGING LATTICE FOR TEMPERATURE CONTROL IN MULTILAYERED PRINTED BOARD

K. V. Zaichko<sup>1,2</sup>, D. V. Ivlenkov<sup>1</sup>, S. A. Ilvutikov<sup>1</sup>, S. N. Sharangovich<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: zaichkokv@gmail.com

*The results of embedding an optical fiber with Bragg gratings in a multilayer printed circuit board are presented. Experimental studies have shown that embedding a fiber with a “preload” gives the most accurate temperature measurement results, which in turn is an important criterion in the development of spacecraft.*

*Keywords: optical fiber; fiber optic sensors; multilayer printed cards; temperature exposure.*

Применение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является наиболее перспективным решением, отвечающим требованиям не только высокой скорости передачи информации, но и также повышенной надежности, долговечности, малых габаритов, массы и энергопотребления, совместимости с уже существующими устройствами обработки информации.

Волоконно-оптические датчики это оптоволоконные устройства для определения некоторых величин, таких как температура или механического напряжения, но иногда так же смещения, вибраций, давления, ускорения, вращения (измеряется с помощью оптических гироскопов на основе эффекте Саньяка), и концентрации химических веществ.

Датчики на оптическом волокне имеют целый ряд преимуществ относительно электрических датчиков:

- возможность мультиплексирования;
- дистанционные измерения;
- устойчивость к электромагнитным помехам;
- отсутствие электричества в точке измерения [1–5].

Цель работы – разработка, изготовление и экспериментальное исследование макетного образца платы, который будет оснащаться тепловыми имитаторами и

точечными датчиками с волоконной Брэгговской решеткой (ВБР).

В одну плату необходимо монтировать одно оптоволокно, которое с помощью сварки присоединяют к оптическому разъему. На волокне должны располагаться датчики с ВБР – 3 шт.

В рамках эксперимента использовалось три образца оптического волокна с датчиками ВБР, размещенных в многослойной печатной плате (МПП).

Важнейшим шагом после того, как плата была окончательно изготовлена, убедиться в целостности размещаемого ОВ, а также установить особенности воздействия стеклотекстолитового слоя на оптический волновод. Так как стеклотекстолитовый слой и ОВ имеют разные коэффициенты линейного теплового расширения, имелось предположение, что при температурном воздействии ОВ может выйти из строя.

Для этого каждый образец МПП размещался в климатической камере тепла-холода «ТНС(S) 100», где подвергался температурным воздействиям в диапазоне от минус 50 до плюс 50 °С. В результате первой экспериментальной итерации установлено, что ОВ при монтаже сохранило свою работоспособность.

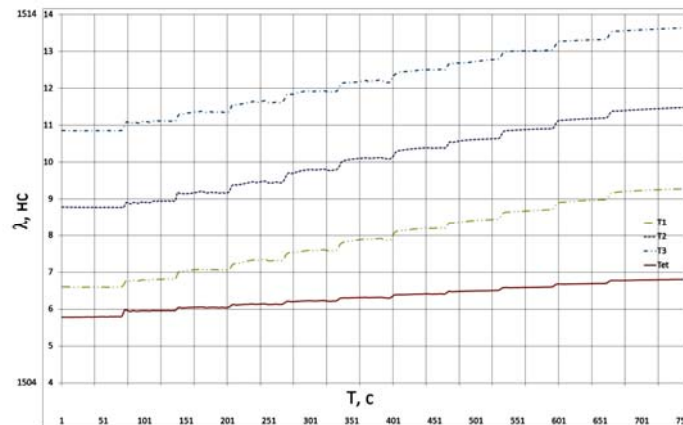


График зависимости длины волны от температуры для третьей МПП

В результате проведенного второго опыта выявлено значительное улучшение показаний температуры, так как алюминиевая пластина стабилизировала температурное поле МПП.

В свою очередь не все платы разрабатываются с наличием алюминиевой пластины. Таким образом, встает задача разработать унифицированный метод встраивания ОВ в МПП, что удалось достичь в результате заключительной экспериментальной итерации.

На третьем образце платы монтаж датчиков производился с натяжением, так как правильное натяжение волокна является ключевым моментом монтажа.

В результате опытных испытаний выявлено, что самый эффективный метод монтажа ОВ в МПП является для датчика T1. Так как показания имели наименьшую погрешность относительно эталонного датчика (Tet) и как видно на графике (см. рисунок) переходы между температурными «полками» имеют наиболее плавный характер.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, методика монтажа оптического волокна в многослойную печатную плату с предварительным натяжением, по третьему варианту, является наиболее эффективной, так как полученные результаты имеют минимальную погрешность относительно эталонного датчика и унифицированной, что в свою очередь дает возможность применения для имеющегося оборудования.

Во-вторых, полученная методика встраивания оптического волокна в многослойную печатную плату может быть использована при производстве интеррогатора с повышенной радиационной устойчивостью.

#### Библиографические ссылки

1. Буймистрюк Г. Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем : монография. СПб. : ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. 191 с.

2. К вопросу об интеграции оптоволокна в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брегговских решеток / В. В. Махсидов, М. Ю. Федотов, А. М. Шиенок, М. А. Зувев // Механика композиционных материалов и конструкций. 2014. Т. 20, № 4. С. 568–574.

3. The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths / D. Kanga, S. Parkb, C. Hongb, C. Kimb // NDT&E International. 2005. Vol. 38, № 8. P. 712–718.

4. Characterization of the response of fibre Bragg grating sensors subjected to a two-dimensional strain field / I. Bosia, P. Giaccari, J. Botsis, M. Facchini et al. // Smart Mater. Struct. 2003. Vol. 12. P. 925–934.

5. Development of smart composite structures with small-diameter ber Bragg grating sensors for damage detection: quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using lamb wave sensing / N. Takeda, Y. Okabe, J. Kuwahara et al. // Compos. Sci. Technol. 2005. Vol. 65. P. 2575–2587.

#### References

1. Buymistryuk G. Ya. Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i tekhnologiya na osnove volokonno-opticheskikh datchikov i sistem: monografiya. SPb. : IVA, GROTs Minatoma, 2005. 191 p.

2. K voprosu ob integratsii optovolokna v PKM i izmerenii deformatsii materiala s pomoshch'yu volokonnykh breggovskikh reshetok / V. V. Makhsidev, M. Yu. Fedotov, A. M. Shienok, M. A. Zuev // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. 2014. T. 20, № 4. P. 568–574.

3. The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths / D. Kanga, S. Parkb, C. Hongb, C. Kimb // NDT&E International. 2005. Vol. 38, № 8. P. 712–718.

4. Characterization of the response of fibre Bragg grating sensors subjected to a two-dimensional strain field / I. Bosia, P. Giaccari, J. Botsis, M. Facchini et al. // Smart Mater. Struct. 2003. Vol. 12. P. 925–934.

5. Development of smart composite structures with small-diameter ber Bragg grating sensors for damage detection: quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using lamb wave sensing / N. Takeda, Y. Okabe, J. Kuwahara et al. // Compos. Sci. Technol. 2005. Vol. 65. P. 2575–2587.

© Заичко К. В., Ивленков Д. В., Ильвутиков С. А., Шарангович С. Н., 2019

## УЗКИЕ РЕЗОНАНСЫ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА\*

В. И. Закомирный<sup>1,2,4</sup>, В. С. Герасимов<sup>1,3</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,3,5\*</sup>, С. В. Карпов<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

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

<sup>2</sup>Департамент Теоретической Химии и Биологии, Школа Биотехнологий,

Королевский Технологический Институт

10691 Стокгольм, Швеция

<sup>3</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>4</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

<sup>5</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: alexander.ershov@icm.krasn.ru

*Исследованы эффекты влияния ограниченного размера структуры из диэлектрических (Si) сферических наночастиц на узкие решеточные резонансы. Показана возможность управления оптическим сигналом за счет изменения геометрии структуры. Полученные данные открывают возможности для применения 2-D массивов из диэлектрических (Si) наночастиц в качестве элементов оптических интегральных микросхем нового поколения, используемых в современных спутниковых системах.*

*Ключевые слова: наночастица, диэлектрические наночастицы, поверхностный резонанс, узкие резонансы.*

## NARROW RESONANCES IN PERIODIC DIELECTRIC STRUCTURES WITH FINITE SIZE

V. I. Zakomirnyi<sup>1,2,4</sup>, V. S. Gerasimov<sup>1,3</sup>, A. E. Ershov<sup>1,3,5\*</sup>, S. V. Karpov<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Division of Theoretical Chemistry and Biology, School of Biotechnology,

KTH Royal Institute of Technology,

10691 Stockholm, Sweden

<sup>3</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>4</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

50/38, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>5</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: alexander.ershov@icm.krasn.ru

*The paper proposed a study about effects of a limited size structure of dielectric (Si) spherical nanoparticles on narrow lattice resonances. The possibility of controlling an optical signal by changing the geometry of the structure is shown. The data obtained the possibility of using 2-D arrays of dielectric (Si) nanoparticles as elements of a new generation of optical integral circuits used in modern satellite systems.*

*Keywords: nanoparticles, dielectric nanoparticles, surface resonance, narrow resonance.*

**Введение.** В настоящее время весьма актуальным является исследование оптических свойств периодических структур из наночастиц, обладающих поверхностным резонансом.

Особое внимание вызывают устройства на основе полностью диэлектрических (Si) наночастиц [1], которые обеспечивают функционирование на оптических частотах с низкими потерями и открывают возможности использования в качестве функциональных

элементов оптических микросхем нового поколения. Применение таких микросхем является перспективным во многих областях науки и техники, в особенности для производства спутниковых систем нового поколения.

Оптические свойства периодических структур из диэлектрических наночастиц обладают значительным преимуществом, а именно: они могут поддерживать сразу два коллективных решеточных резонанса [2].

\*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-00066).

Природа существования двух резонансов связана с проявлением электрической дипольной (ЭД) и магнитной дипольной (МД) моды в диэлектрических (Si) наночастицах.

**Модель.** Коллективные эффекты, возникающие в массивах диэлектрических наночастиц, основаны на взаимодействии ЭД и МД резонансов одиночных наночастиц и аномалии Рэллея. Такое взаимодействие принято называть поверхностным резонансом (ПР). Положением аномалии Рэллея [3] можно управлять путем изменения геометрии наночастиц и шага решетки и количества наночастиц.

Существенная часть теоретических работ, посвященных исследованию оптических свойств двумерных структур, основана на использовании метода связанных диполей [4]:

$$\mathbf{d}_i = \alpha^e \left( \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq i}^N \hat{G}_{ij} \mathbf{d}_j - \sum_{j \neq i}^N \mathbf{g}_{ij} \times \mathbf{m}_j \right),$$

$$\mathbf{m}_i = \alpha^m \left( \mathbf{H}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_i) + \sum_{j \neq i}^N \hat{G}_{ij} \mathbf{m}_j + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{g}_{ij} \times \mathbf{d}_j \right),$$

где  $\mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$  представляется собой электрическое поле,  $\mathbf{H}_{\text{inc}}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$  – магнитное поле;  $\mathbf{r}_i$  – позиция  $i$ -й наночастицы;  $\alpha^e$  и  $\alpha^m$  это электрическая и магнитная дипольные поляризуемости наночастиц. Где тензоры  $\hat{G}_{ij}$  и  $\mathbf{g}_{ij}$ :

$$\hat{G}_{ij} = \frac{\exp(ikr_{ij})}{r_{ij}} \times \left[ \left( k^2 - \frac{1}{r_{ij}^2} + \frac{ik}{r_{ij}} \right) \hat{I} + \left( -k^2 + \frac{3}{r_{ij}^2} - \frac{3ik}{r_{ij}} \right) \frac{\mathbf{r}_{ij} \otimes \mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \right],$$

$$\mathbf{g}_{ij} = \frac{\exp(ikr_{ij})}{r_{ij}} \left( k^2 + \frac{ik}{r_{ij}} \right) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}},$$

где  $\hat{I}$  – это  $3 \times 3$  единичный тензор, расстояние между центрами частиц рассчитывается как  $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ij}| = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ , а волновой вектор  $k = |\mathbf{k}| = 2\pi / \lambda$ . Эффективность экстинкции данной структуры будет считаться по следующей формуле:

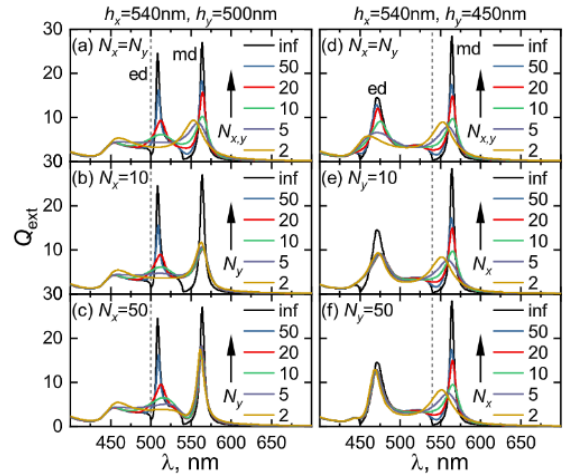
$$Q_{\text{ext}} = \frac{4k}{|\mathbf{E}_0|^2 NR^2} \text{Im} \sum_{i=1}^N [\mathbf{d}_i \cdot \mathbf{E}_{\text{inc}}^*(\mathbf{r}_i) + \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{H}_{\text{inc}}^*(\mathbf{r}_i)],$$

где \* означает комплексное сопряжение.

**Результаты.** Далее перейдем к спектрам экстинкции двумерных массивов диэлектрических (Si) наночастиц. Все частицы в составе периодической структуры идентичны, имеют сферическую форму с  $R = 65$  нм. Межчастичное расстояние в направлении  $X$  и  $Y$  оси выбран таким образом, чтобы получить максимальное значение интенсивности экстинкции резонансов.

На рисунке (a, d) изображены положения ЭД и МД резонансов для квадратных массивов (количество частиц по  $X$  и  $Y$  осям совпадает), в то время как на рисунке (b, e) и (c, f) изображены прямоугольные мас-

сивы наночастиц (разное количество частиц по  $X$  и  $Y$  осям).



Спектры экстинкции периодической структуры из сферических наночастиц Si с радиусом  $R = 65$  нм для различного количества наночастиц  $N_x$  и  $N_y$ , с такими значениями периода решетки  $h_x$  и  $h_y$  по оси  $X$  и  $Y$  соответственно, при которых наблюдается наибольшее взаимодействие с аномалиями Рэллея (вертикальная пунктирная линия)

Как видно по рисунку (b, c), увеличение количества наночастиц  $N_y$  приводит к усилению электрического дипольного резонанса. В случае увеличения количества наночастиц  $N_x$  на рисунке (e, f) увеличивается интенсивность магнитного дипольного резонанса при отсутствии влияния на электрический дипольный резонанс. Увеличение количества частиц по двум направлениям одновременно на рисунке (a, b) положительно сказывается на интенсивности и добротности обоих резонансов одновременно.

**Заключение.** Было продемонстрирована возможность получения узких резонансов в структурах из диэлектрических наночастиц. Положение и эффективность резонанса зависит не только от геометрии решетки, но и количества наночастиц.

## References

1. Staude I., Pertsch T., Kivshar Y. S. All-dielectric resonant meta-optics lightens up // *ACS Photonics*. 2019. № 6. P. 802–814.
2. Babicheva V. E., Evlyukhin A. B. Resonant lattice Kerker effect in metasurfaces with electric and magnetic optical responses // *Laser & Photonics Reviews*. 2017. № 11. P. 1700132.
3. Wood R. W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum // *Proceedings of the Physical Society of London*. 1902. № 18. P. 269.
4. Optical response features of Si-nanoparticle arrays / A. B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel, B. S. Luk'Yanchuk, B. N. Chichkov // *Physical Review B*. 2010. № 82. P. 045404.

© Закомирный В. И., Герасимов В. С., Ершов А. Е., Карпов С. В., 2019

УДК 52-16/-17; 520.88

## ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДА РАЗНЕСЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЙ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ\*

А. В. Коновальчиков, Е. Г. Лапухин\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

*Реализованный в программе метод Лафлера–Кинмана позволяет определить период периодически изменяемой величины в случае разнесенных во времени и неравноточных измерений с возможностью последующей визуализации данных.*

*Ключевые слова: разнесенные во времени измерения, кривая блеска, метод Лафлера–Кинмана, фазовая кривая.*

## THE PROGRAM FOR DETERMINING THE PERIOD OF TIME-SPACED MEASUREMENTS AND DATA VISUALIZATION

A. V. Konovalchikov, E. G. Lapukhin\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

*The Lafler-Kinman method, which allows determining the period of a variable in the case of spaced-apart measurements with the possibility of visualizing data, is presented in the programs.*

*Keywords: time-spaced measurements, light curve, Lafler–Kinman method, phase curve.*

Определение периода изменения какой-либо величины в периодических или квазипериодических процессах не представляет особой сложности, если измерения проводятся с достаточной частотой и непрерывно. Если за время одного периода количество измерений мало, и они не равноотстоящие друг от друга, то «прямое» определение периода прямыми измерениями последовательных моментов однотипных экстремумов или равных фаз – не реализуемо. Такие ситуации возможны, если длительность фиксации одного измерения соизмерим с периодом изменения величины, или если по определенным причинам невозможно получить доступ к объекту (процессу), например, влияние погодных условий при наземных наблюдениях космических объектов.

В программе «Определение вероятного периода» реализован метод Лафлера–Кинмана, который позволяет определить период изменения величины, по разрозненным во времени и неравноточным измерениям [1; 2].

Суть метода заключается в следующем. Для каждого пробного периода  $P_i$  из набора периодов (включает в себя вероятный период  $P_0$ ) вычисляется параметр  $\theta$ , характеризующий дисперсию величины (разброс точек около вероятной кривой). Наиболее вероятному периоду соответствует наименьшее значение параметра  $\theta$ . Чтобы исключить возможность пропуска правильного периода, пробные периоды берутся с интервалом, зависящим как от всего сета измерений,

так и от величины максимального смещения фазы  $\Delta\varphi$  одного измерения для двух последовательных пробных периодов  $P_i$  и  $P_{i+1}$  [3; 4].

Входными данными для программы являются: файл с измеряемыми величинами (построчно: «время–величина»), диапазон пробных периодов, максимальное смещение фазы для смежных пробных периодов.

По ходу выполнения программы выполняются следующие задачи: сортировка входящих данных по возрастанию времени, определение приращения пробных смежных периодов ( $\Delta P = P_{i+1} - P_i$ ), вычисление и графическое отображение параметра от пробного периода, определение минимального параметра  $\theta$  и соответствующего ему искомого периода  $P_0$ , визуализация изменения измеряемой величины от времени и графическое отображение величины приведенной к найденному периоду, сохранение результатов в выходной файл для использования в программе для визуализации данных и последующих исследованиях [5].

Таким образом, использование данной программы позволяет определить период для разрозненных и неравноточных измерений, и сформировать результаты в выходной файл для дальнейшей массовой визуализации полученных результатов в программе «Визуализация массива разнесенных во времени измерений периодически изменяемой величины блеска небесных объектов, с приведением к одному периоду в координатном пространстве «величина–фаза».

\*Работа выполнена в рамках Государственного задания № 3.6822.2017/7.8.

**Библиографические ссылки**

1. Lafler J., Kinman T. D. An RR Lyrae Star Survey with the Lick 20-INCH Astrograph II. The Calculation of RR Lyrae Periods by Electronic Computer. *Astrophysical Journal Supplement*. 1965. Vol. 11. P. 216.
2. Методы исследования переменных звезд / Н. Е. Курочкин, В. П. Цесевич, П. Н. Холопов и др. ; под ред. В. Б. Никонова. М. : Наука, 1971.
3. Evans D. S. The double-lined spectroscopic binary HD 133822 with notes on methods of investigation, *Publication: Royal Observatory bulletins; № 30* ; *Royal Observatory bulletins. Series E ; № 30*. London : H.M.S.O., 1961. P. 93–98.
4. Холопов П. Н. Программы для определения периодов периодических переменных звезд любых типов с помощью электронных цифровых вычислительных машин М-20 и БЭСМ-4 // *Труды гос. астрономического института им. П. К. Штернберга*. 1970. Т. 40. С. 72–105.
5. Лапухин Е. Г., Карташов С. И., Докучаева М. С. Визуализация массива разнесенных во времени измерений периодически изменяемой величины блеска небесных объектов, с приведением к одному периоду в координатном пространстве «величина-фаза» : свидетельство о гос. рег. пр. для ЭВМ RU 2019616836. № 2019615679 20.05.2019 ; опубл. 30.05.2019. Бюл. № 6.

**References**

1. Lafler J., Kinman T. D. An RR Lyrae Star Survey with the Lick 20-INCH Astrograph II. The Calculation of RR Lyrae Periods by Electronic Computer. *Astrophysical Journal Supplement*. 1965. Vol. 11. P. 216.
2. *Research Methods for Variable Stars* / N. E. Kurochkin, V. P. Tsesevich, P. N. Kholopov et al. ; under the ed. V. B. Nikonov. Moscow, Publ. Nauka, 1971. 333 p.
3. Evans D. S. The double-lined spectroscopic binary HD 133822 with notes on methods of investigation, *Publication: Royal Observatory bulletins; № 30* ; *Royal Observatory bulletins. Series E ; № 30*. London : H.M.S.O., 1961. P. 93–98.
4. Kholopov P. N. [Programs for determining the periods of periodic variable stars of any type using electronic digital computers M-20 and BESM-4] // *Trudy Gosudarstvennogo astronomicheskogo instituta im. P. K. Sternberga*. 1970. T. 40. P. 72–105 (In Russ.).
5. Lapukhin E. G., Kartashov S. I., Dokuchaeva M. S. *Vizualizatsiya massiva raznesennykh vo vremeni izmereniy periodicheski izmenyaemoy velichiny bleska nebesnykh ob"ektov, s privedeniem k odnomu periodu v koordinatnom prostranstve «velichina-faza»* [Visualization of an array of time-spaced measurements of the periodically changing magnitude of the brightness of celestial objects, leading to a single period in the coordinate space “magnitude-phase”]. Program RF № 2019616836, 2019.

© Коновальчиков А. И., Лапухин Е. Г., 2019

УДК 537.634, 57.043

## ТЕРАПИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ, АКТИВИРУЕМЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ\*

А. С. Костюков<sup>1\*</sup>, А.Е. Ершов<sup>1,2,3</sup>, В. С. Герасимов<sup>1,3</sup>, С. В. Карпов<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

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

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

<sup>3</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>4</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

E-mail: Kostukov-a@yandex.ru

*Исследовано поведение системы, состоящей из наночастицы с магнетитовым ядром и золотой оболочки, закрепленной на поверхности мембраны злокачественной клетки с помощью ДНК-аптамера в негреющем переменном магнитном поле. Выполнен анализ сил, действующих на точку крепления аптамера к мембране в месте расположения трансмембранного белка. Оценен вклад отдельных сил в воздействие частицы на мембрану, сопровождающийся контролируемой гибелью клетки и механизмами этого процесса.*

*Ключевые слова: наночастица, нанооболочка, магнитная терапия.*

## THERAPY OF MALIGNANT TUMORS BY MEANS OF MAGNETIC NANOPARTICLES ACTIVATED IN A LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELD

A. S. Kostyukov<sup>1</sup>, A. E. Ershov<sup>1,2,3</sup>, V. S. Gerasimov<sup>1,3</sup>, S. V. Karpov<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>4</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

50/38, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

E-mail: Kostukov-a@yandex.ru

*We have studied the behavior of the system consisting of a nanoparticle with a magnetite core and a gold shell bound with the surface of the malignant cell membrane via a DNA aptamer in a non-heating alternating magnetic field. We have analyzed the forces and their values acting from nanoparticle on the point of attachment of the aptamer to the membrane at the location of the trans-membrane protein and the influence of these forces on the controlled cell death, as well as the mechanisms of this process.*

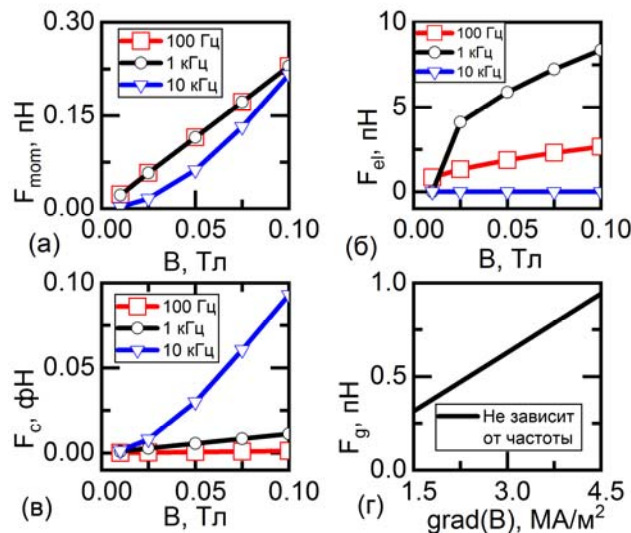
*Keywords: nanoparticle, nanoshell, magnetic therapy.*

Биоконъюгаты наночастиц с биомакромолекулами относятся к числу важнейших объектов междисциплинарных исследований, среди которых наибольшим прикладным потенциалом обладают исследования в области биомедицины и биотехнологий [1]. Среди современных подходов, развиваемых в биомедицине, особое место занимают неинвазивные подходы, использующие электромагнитные поля (ЭМП) для активации наночастиц. Воздействие ЭМП на организм создает меньшие риски и опасно-

сти, чем химические, радиационные или хирургические методы. ЭМП легко дозируются и контролируются, а их действие может быть сфокусировано в любой области внутренних органов с размерами порядка 1 мм [2].

Магнитные наночастицы (МНЧ) в переменном магнитном поле могут оказывать механическое воздействие на целевую область мембраны злокачественной клетки, где расположены трансмембранные белки, играющие роль рецепторов клетки.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Красноярского КФН в рамках научного проекта № 18-42-243023, гранта президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (соглашение 075-15-2019-676).



Максимальные значения силы, действующей на трансмембранный белок перпендикулярно плоскости мембраны. В случае вращательного движения частицы на (а, б, в) начальный угол между магнитным моментом и полем был равен  $90^\circ$ , а в градиентном поле (г) –  $0^\circ$ .

При превышении пороговой силы, приложенной к белку, в клетке запускается процесс апоптоза, или контролируемой гибели клетки. Величины сил, необходимых для запуска апоптоза в различных клетках подробно рассматриваются в работе [2].

Для повышения безопасности терапии важно использовать негреющие магнитные поля. В качестве допустимых параметров ЭМП в биомедицине часто используется соотношение между напряженностью и частотой магнитного поля  $Hf < 4.85 \cdot 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Гц}$  [3]. В наших расчетах мы рассматривали частоты от 100 Гц до 10 кГц с напряженностью до  $10^4 \text{ A/m}$ .

В данной работе проводилось моделирование движения МНЧ, прикрепленной к мембране злокачественной клетки с помощью ДНК-аптамера размером порядка 3 нм [4; 5], в переменном магнитном поле. МНЧ представляет собой магнетитовое ядро размером 10 нм, равномерно покрытое золотой оболочкой. Полный диаметр частицы – 40 нм. Малый размер магнитного ядра позволяет ему оставаться в суперпарамагнитном состоянии, то есть сохранять вектор намагниченности независимо от состояния внешнего поля. Использование золотой оболочки для наночастиц является распространенным решением в биомедицине, так как его инертность повышает биосовместимость частиц, и обеспечивает связывание ДНК-аптамеров с поверхностью частицы. Конъюгат «частица-аптамер» закреплен на мембране таким образом, что частица может совершать вращательное движение вокруг точки её прикрепления к мембране, ограничиваясь максимальным отклонением от перпендикуляра к мембране, при котором частица касается мембраны.

Для запуска процесса апоптоза сила, приложенная к белку-рецептору, должна быть направлена перпендикулярно мембране клетки и пытаться «вытащить» белок из мембраны. Если за время воздействия полем

будет превышена пороговая сила порядка 1–10 пН [2], то воздействие можно считать успешным. В ходе работы был оценен отдельный вклад различных сил, воздействующих на целевой белок. Нами были выделены следующие силы:

1. Сила, возникающая в точке крепления аптамера к мембране при наличии момента силы на магнитном ядре частицы, появляющемся при взаимодействии магнитного момента частицы с внешним полем ( $F_{mom}$ ).
2. Центробежная сила, действующая на трансмембранный белок при повороте МНЧ из одного крайнего положения в другое ( $F_c$ ).
3. Сила упругости, возникающая при ударе (принимается абсолютно упругим) движущейся частицы по мембране ( $F_{el}$ ).
4. Сила, взаимодействия магнитного момента частицы с неоднородным (градиентным) магнитным полем ( $F_g$ ).

Максимальные значения проекции силы на направление, перпендикулярное мембране, приведены на рисунке. При выполнении работы было установлено, что при высоких частотах внешнего ЭМП частица не успевает достигнуть крайнего положения и контакта с мембраной, и совершает колебательные движения вблизи некоего центра равновесия. При этом сила, вносящая основной вклад в воздействие на трансмембранный белок – упругая сила, отсутствует. Это делает неэффективным использование слишком высоких частот. Однако на частотах, при которых удар частицы по мембране наблюдается (например, 100 Гц и 1 кГц на рисунке, б), высокая частота оказывается более предпочтительна, так как частица успевает набрать большую скорость за время «перескока» из одного крайнего положения в другое.

Таким образом, необходимо точно рассчитывать частоту внешнего поля для максимизации воздейст-



вия, так чтобы частица не переходила к колебательному движению.

#### Библиографические ссылки

1. Khlebtsov N. G. Optics and biophotonics of nanoparticles with a plasmon resonance // *Quantum Electronics*. 2008. Vol. 38. P. 504–529.
2. Новые подходы к нанотераностике / Ю. И. Головин, Н. Л. Клячко, А. Г. Мажуга и др. // *Российские нанотехнологии*. 2018. Т. 13. № 5–6.
3. Brezovich I. A. Low frequency hyperthermia: capacitive and ferromagnetic thermoseed methods. In: *biological, physical and clinical aspects of hyperthermia* (Eds B. R. Paliwal, F. W. Hetzel, and M. W. Dewhurst) // *Med. Phys. Monogr.* 1988. Vol. 16. P. 82–111.
4. Zamay G. S. Aptamers Selected to Postoperative Lung Adenocarcinoma Detect Circulating Tumor Cells in Human Blood // *Molecular Therapy*. 2015. Vol. 23. P. 1486–1496.
5. Zhang Jiani. Aptamer-conjugated gold nanoparticles for bioanalysis // *Nanomedicine*. 2013. Vol. 8. P. 983–993.

#### References

1. Khlebtsov N. G. Optics and biophotonics of nanoparticles with a plasmon resonance // *Quantum Electronics*. 2008. Vol. 38. P. 504–529.
2. New approaches to nanoteranostics / Ju. I. Golovin, N. L. Klyachko, A. G. Mazhug et al. // *Rossijskie nanotehnologii*. 2018. Vol. 13. № 5–6. (In Russ.).
3. Brezovich I. A. Low frequency hyperthermia: capacitive and ferromagnetic thermoseed methods. In: *biological, physical and clinical aspects of hyperthermia* (Eds B. R. Paliwal, F. W. Hetzel, and M. W. Dewhurst) // *Med. Phys. Monogr.* 1988. Vol. 16. P. 82–111.
4. Zamay G. S. Aptamers Selected to Postoperative Lung Adenocarcinoma Detect Circulating Tumor Cells in Human Blood // *Molecular Therapy*. 2015. Vol. 23. P. 1486–1496.
5. Zhang Jiani. Aptamer-conjugated gold nanoparticles for bioanalysis // *Nanomedicine*. 2013. Vol. 8. P. 983–993.

© Костюков А. С., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Карпов С. В., 2019

## ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ ДИОДНЫЙ ЭФФЕКТ В ИК-ОБЛАСТИ В ПЛЕНКАХ $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$ \*

В. В. Кретинин\*, С. С. Аплеснин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: kret\_vas@mail.ru

*В пленках феррита висмута  $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 < x < 0,15$ ) обнаружен фотоиндуцированный диодный эффект в ближней ИК и фиолетовой областях спектра. Определена зависимость диодного эффекта от длины волны, мощности освещения, температуры.*

*Ключевые слова: мультиферроики, диодный эффект, поляризация.*

## IR-RANGE PHOTOINDUCED DIODE EFFECT IN THE $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$ THIN FILMS

V. V. Kretinin\*, S. S. Aplesnin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: kret\_vas@mail.ru

*The near IR and violet photoinduced diode effect has been found in the  $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 < x < 0,15$ ) films in a wide temperature interval. The dependences of the diode effect on wavelength, illumination power and temperature have been established.*

*Keywords: multiferroics, diode effect, polarization.*

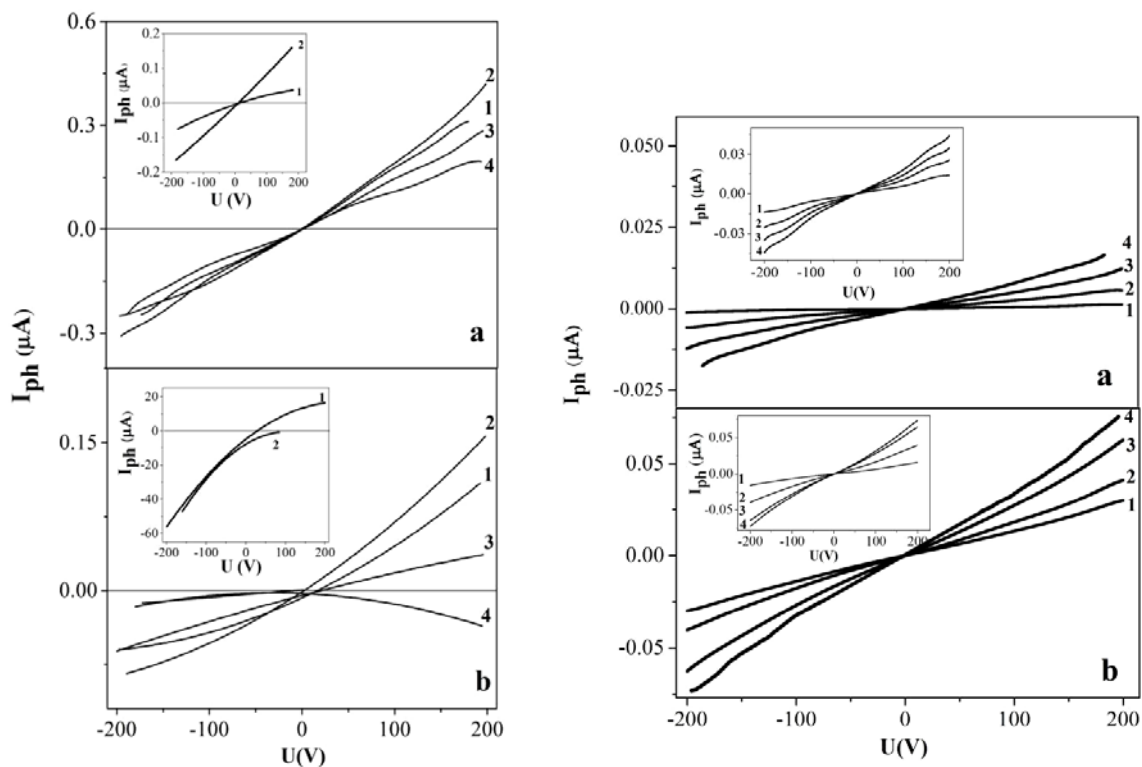
В мультиферроиках существует два типа доменов; сегнетоэлектрические и магнитные, которые связаны между собой. К высокотемпературным мультиферроикам относится в том числе феррит висмута, в котором направление фототока зависит от направления электрической поляризации [1; 2]. Манипулировать сегнетоэлектрическими доменными стенками можно в результате изменения угла поляризации когерентного источника света и переключением электрического поля [3]. Индуцируемые светом носители тока компенсируют электрическое поле поляризации и ухудшают сегнетоэлектрические свойства. В сегнетоэлектриках ширина запрещенной зоны (щель в спектре электронных возбуждений) больше 3 эВ, а в феррите висмута щель находится в оптическом диапазоне и при замещении 3d-металлами щель смещается в ближний ИК-диапазон [4; 5]. Создание мультиферроиков с небольшой щелью в спектре электронных возбуждений и с большим поглощением электромагнитного излучения в видимом и в ИК диапазоне является перспективным для создания новых оптоэлектронных приложений, аттенуаторов, сенсоров и мемристорных устройств.

Диодная характеристика фототока определена из вольтамперных характеристик, измеренных при освещении на двух длинах волн  $\lambda = 405$  нм и 830 нм при фиксированных температурах. Влияние света на ВАХ

исследовалось при четырех мощностях освещения для красного лазера до  $0,6$  Вт/см<sup>2</sup>, для голубого до  $0,08$  Вт/см<sup>2</sup>. Зависимости фототока  $I_{ph} = I(\text{IR}) - I(0)$  от напряжения представлены на рисунке.

Для состава  $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  с  $x = 0,05$  интенсивность оптического поглощения линейно растет от частоты в запрещенной зоне, что вызвано сильной флуктуацией кулоновского потенциала в пленке. Для этого состава найдена прямая и косвенная щель, связанная с переходом электронов из состояний ниже уровня Ферми дырок в состояния выше уровня Ферми электронов вблизи зоны проводимости. Для состава с  $x = 0,15$  существует примесная подзона, образованная ионами марганца, которая согласуется с LDA расчетами. В пленках  $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  с  $x = 0,05$  обнаружен гистерезис электрической поляризации, который отсутствует для состава с  $x = 0,15$ . Проводимость пленок подчиняется закону Ома для  $x = 0,05$  и Пула–Френкеля с  $x = 0,15$ . Найдена зависимость фототока от интенсивности освещения на двух длинах волн, в фиолетовой и инфракрасной области спектра. При освещении на длине волны 405 нм фототок проходит через максимум для  $x = 0,05$  и плавно растет для  $x = 0,15$  с ростом интенсивности освещения. В ИК области фототок выходит на насыщение. Обнаружена зависимость диодного эффекта в ближней ИК и в фиолетовой областях в  $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  от температуры и концентрации.

\*Работа поддержана грантом № 18-52-00009 Бел\_а.



Температурная зависимость фототока тока  $I_{ph} = I(IR) - I(0)$  от напряжения при  $\lambda = 405$  нм для образцов  $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$  с  $x = 0,05$  (слева) и  $x = 0,15$  (справа) при  $P_w = 0,015$  Вт·см<sup>2</sup> (1),  $P_w = 0,035$  Вт·см<sup>2</sup> (2),  $P_w = 0,06$  Вт·см<sup>2</sup> (3),  $P_w = 0,08$  Вт·см<sup>2</sup> (4); а –  $T = 300$  К ( $x = 0,05$ ) и  $T = 340$  К ( $x = 0,15$ ), б –  $T = 340$  К ( $x = 0,05$ ) и  $T = 390$  К ( $x = 0,15$ ).

Во вставке – зависимости  $I_{ph}(U)$  при  $\lambda = 830$  нм

Диодный эффект связан с асимметрией квантовых ям в результате наличия электрической поляризации в пленке, с изгибом зон вблизи поверхности пленки и заполнением квантовых ям электронами и дырками в результате отличия времен термолинизации носителей тока и рекомбинации электронов и дырок.

### References

1. Yang M., Bhatnagar A., Luo Z., Alexe M. [Enhancement of local photovoltaic current at ferroelectric domain walls in  $\text{BiFeO}_3$ ] // *Nat. Sci. Reports*, 2017. № 7. P. 43070–8.
2. Yang S. Y., Seidel J., Byrnes S. J., Shafer P., Yang C. H., Rossell M. D., Yu P., Chu Y. H., Scott J. F., Ager J. W., Martin L. W., Ramesh R. [Above-bandgap voltages from ferroelectric photovoltaic devices] // *Nat. Nanotechnol.* 2010. № 5. P. 143.

3. Zhao T., Scholl A., Zavaliche F., Lee K., Barry M., Doran A., Cruz M. P., Chu Y. H., Ederer C., Spaldin N. A., Das R. R., Kim D. M., Baek S. H., Eom C. B., Ramesh R. [Electrical control of antiferromagnetic domains in multiferroic  $\text{BiFeO}_3$  films at room temperature] // *Nat. Mater.*, 2006. № 5. P.823.

4. West D.V., Torres M., Gou G., Stein D. M., Wu L., Chen G., Gallo E. M., Akbashev A. R., Davies P. K., Spanier J. E., Rappe A. M., Grinberg I. [Perovskite oxides for visible-light-absorbing ferroelectric and photovoltaic materials] // *Nature*. 2013. № 503. P. 509.

5. Nechache R., Harnagea C., Li S., Cardenas L., Huang W., Chakrabarty J., Rosei F. [Bandgap tuning of multiferroic oxide solar cell] // *Nat. Photonics*. 2015. № 9. P. 61.

© Кретинин В. В., Аплеснин С. С., 2019

УДК 539.25

**ИССЛЕДОВАНИЕ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ  
КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ АТОМНЫХ И ВАКАНСИОННЫХ СКОПЛЕНИЙ  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ А2В6 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 400 КЭВ**

Ю. Ю. Логинов<sup>1</sup>, А. В. Мозжерин<sup>2</sup>, А. В. Брильков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: loginov@sibsau.ru

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru

*Методами высоковольтной электронной микроскопии исследована кинетика образования атомных и вакансионных скоплений в полупроводниках А2В6 при облучении электронами с энергией 400 кэВ. Определены зависимости радиусов скоплений междоузельных атомов и вакансий в зависимости от времени облучения. Рассчитаны кинетические параметры, такие как, энергии активации процессов образования атомных и вакансионных скоплений при облучении электронами. Результаты необходимо учитывать при анализе срока активного существования полупроводниковых приборов в условиях космической и земной радиации.*

*Ключевые слова:* облучение электронами, полупроводники, высоковольтная электронная микроскопия, структурные дефекты.

**COMPUTER SIMULATION OF THE STRUCTURAL DEFECTS FORMATION  
IN CADMIUM TELLURIDE**

Y. Y. Loginov<sup>1</sup>, A. V. Mozzherin<sup>2</sup>, A. V. Brilikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: loginov@sibsau.ru

<sup>2</sup> Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru

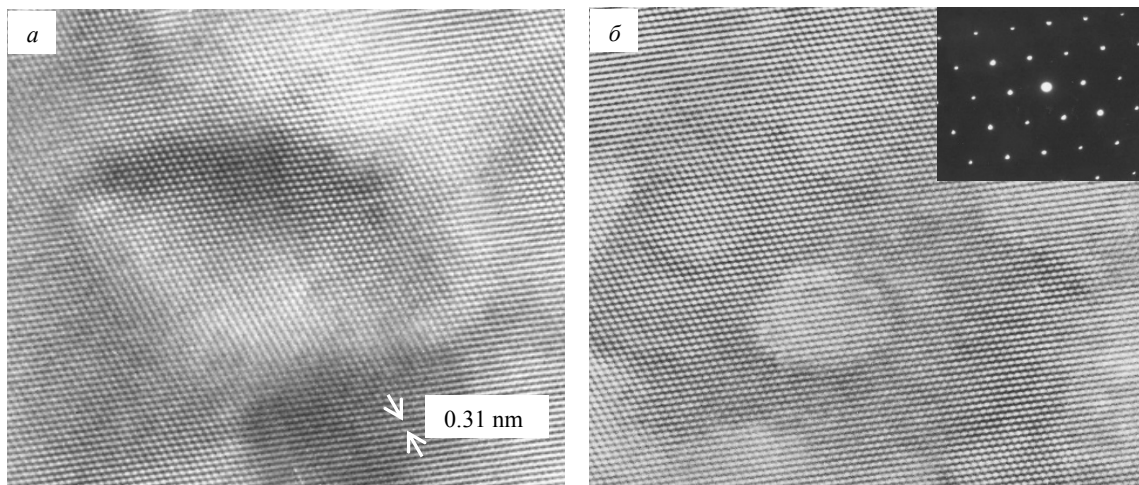
*The kinetics of the formation of atomic and vacancy clusters in A2B6 semiconductors under irradiation with 400 keV electrons in a high-voltage electron microscope was studied. The dependences of the radii of clusters of interstitial atoms and vacancies depending on the irradiation time are determined. Kinetic parameters, such as the activation energies of the formation of atomic and vacancy clusters upon electron irradiation, were calculated. The results must be taken into account when analyzing the active life of semiconductor devices in space and terrestrial radiation.*

*Keywords:* electron irradiation, semiconductors, high voltage electron microscopy, structural defects.

Полупроводниковые соединения А2В6, такие как CdTe, ZnS, ZnSe, CdHgTe, ZnTe, CdS и CdSe активно используются в промышленности для производства полупроводниковых приборов широкого назначения. Однако низкое значение энергии дефекта упаковки этих материалов по сравнению с полупроводниковым кремнием обуславливает высокую чувствительность к воздействию различного рода облучения (электронами, протонами, ионами). Например, CdTe чувствителен к воздействию ионизирующего излучения из-за низкого значения энергии дефекта упаковки (ЭДУ), равного  $11 \pm 2$  мДж/м<sup>2</sup>, и облучение CdTe электронами вызывает образование и эволюцию структурных дефектов, в том числе формирование новых атомных и вакансионных скоплений [2].

В данной работе исследовали кинетику атомных и вакансионных скоплений в полупроводниках CdTe, ZnS, SnSe и CdS непосредственно в высоковольтном электронном микроскопе, облучая эти материалы электронами с энергией 400 кэВ.

На рисунке, а показано изображение с высоким разрешением междоузельной дислокационной петли, образованной в ZnS после облучения в течение 5 мин. После облучения в течение 15 минут дислокационная петля сокращается, за счет ухода из этого скопления атомов (см. рисунок, б). Также видно образование пустот, которые образуются при накоплении вакансий, что свидетельствует о дальнейшей миграции атомов и вакансий в материале под действием электронного облучения.



ВРЭМ-изображение облученного ZnS электронами с энергией 400 кэВ с интенсивностью  $4 \cdot 10^{19}$  эл./см<sup>2</sup>с в течение 5 минут (а) и 15 минут (б)

В то же время кристаллическая структура материала сохраняется, о чем свидетельствует электронограмма, полученная из того же места образца и показанная в верхнем правом углу на рисунке, б.

Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках могут быть использованы для решения задач управления типом, плотностью и пространственным распределением дефектов в кристаллической структуре, что важно для реализации предельных параметров микроэлектронных устройств.

#### Библиографическая ссылка

1. Логинов Ю. Ю., Браун П.Д., Дьюроуз К. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках А2В6. М. : Логос, 2003. 304 с.

#### Reference

1. Loginov Y, Brown P, Durose K. The Regularities of Structural Defect Formation in Semiconductors II–VI. Moscow, Logos, 2003.

© Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В., 2019

УДК 539.21:537.86

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛЕНОК $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

А. Н. Масюгин\*, О. Б. Бегишева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: albert.masyugin@mail.ru

*В температурном диапазоне 80–360 К исследованы ИК-спектры поглощения тонких пленок  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  на подложке GGG. Измерены значения индуцированной электрической поляризации пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в магнитном поле. Полученные результаты могут потенциально помочь исследователям рационально оптимизировать соединения мультиферроиков в целях разработки новых электрооптических устройств для ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: магнитострикция, электрострикция, мультиферроик, ИК-спектроскопия.*

## MAGNETOELECTRIC EFFECT AND IR-SPECTROSCOPY OF $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ FILMS

A. N. Masyugin\*, O. B. Begisheva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: albert.masyugin@mail.ru

*In the temperature range of 80–360 K, IR absorption spectra of thin  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  films on a GGG substrate were studied. The values of the induced electric polarization of the  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  film in a magnetic field were measured. The results obtained may potentially help researchers to rationally optimize the compound multiferroic to develop new electro-optical devices for the space industry.*

*Keywords: magnetostriction, electrostriction, multiferroics, IR spectroscopy.*

Цериевый ферритгранат считается перспективным магнитооптическим материалом в изготовлении оптических изоляторов для длины волны 1550 нм [1] за счет проявления в нем эффекта Фарадея [2]. В тонких пленках на интерфейсе пленка-подложка и межзеренных границах возможно образование заряженных дефектов. Это может приводить к образованию магнитных поляронов на интерфейсе. Ферриты граната с церием обнаруживают зарядовые флуктуации

$\text{Ce} + 3 - \text{Fe} + 3 = \text{Ce} + 4 - \text{Fe} + 2$  со щелью 1.3 эВ [3]. На интерфейсе и на поликристаллических границах флуктуации кристаллического поля приведут к уменьшению щели.

Кислородные вакансии могут также привести к двухвалентному железу с образованием электрон-дырочных состояний. Эти дефектные зарядовые состояния можно детектировать с помощью метода ИК спектроскопии.

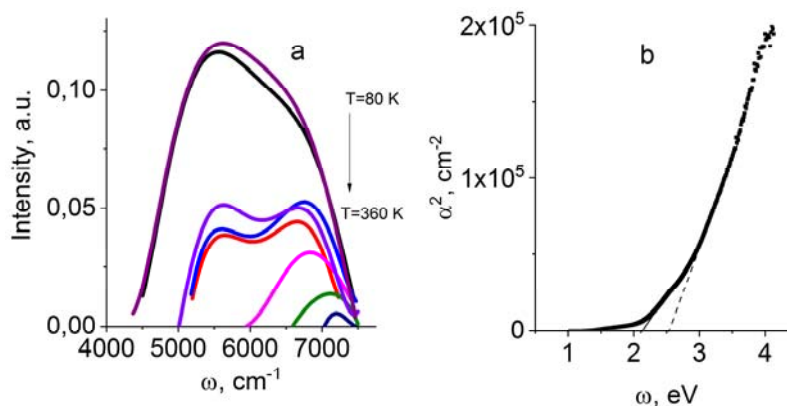


Рис. 1. Интенсивность ИК поглощения  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при температурах  $T = 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360$  К (a), квадрат интенсивности поглощения пленки при  $T = 300$  К (b)

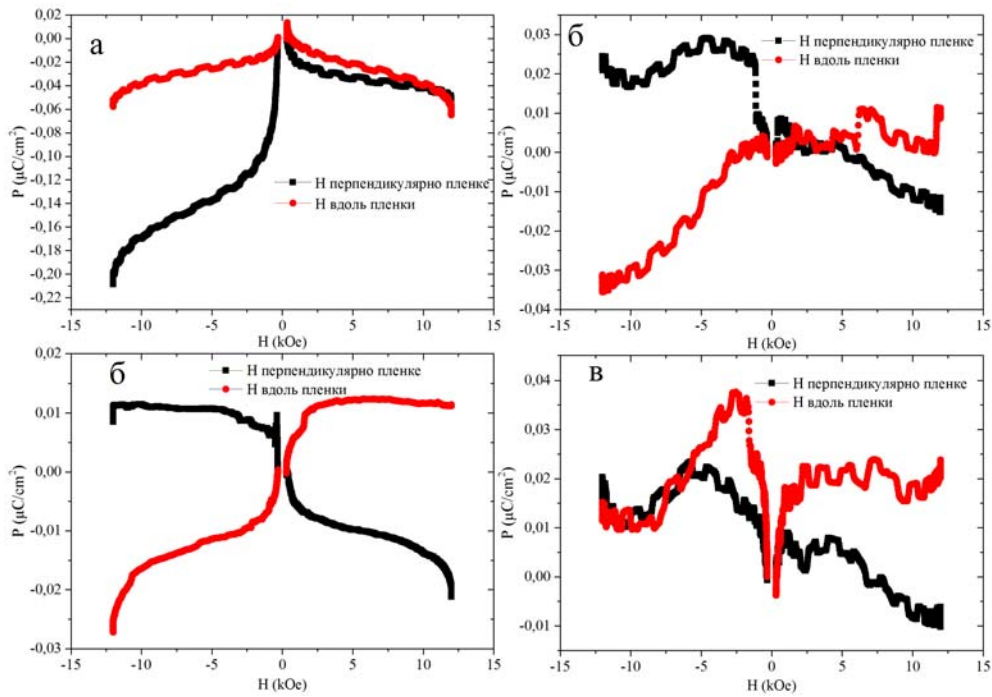


Рис. 2. Электрическая поляризация от напряженности магнитного поля, ориентированного перпендикулярно и вдоль пленки при температурах 80 (а), 240 (б), 300 (в), 360 (з)

Исследовались пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  толщиной 400 нм, полученные методом ионно-лучевого распыления на монокристаллической подложке галлийгадолиниевого граната (GGG (111)). На полученных спектрах оптического поглощения (рис. 1) обнаружено два перехода, связанные с переходом электронов между уровнями  ${}^6\text{A}_1 \rightarrow {}^4\text{T}_2$  в тетраэдре при 2.3 эВ и с переносом заряда  $2\text{p} \rightarrow 3\text{d}$  через кислород  $\text{Fe}_{\text{тет}}-\text{O}-\text{Fe}_{\text{окт}}$  при 2.6 эВ. «Хвосты» в интервале 1.7–2.3 эВ обусловлены флуктуацией кристаллического поля в тетраэдрах на интерфейсе и межзеренных границах. В ИК спектре присутствуют две линии поглощения в области частот  $\omega_1 \sim 5520 \text{ cm}^{-1}$  и  $\omega_2 = 6800 \text{ cm}^{-1}$ . Одна линия на частоте  $\omega_1$  исчезает при 300 К, другая при 400 К.

Измерена электрическая поляризация под действием внешнего магнитного поля, ориентированного перпендикулярно и вдоль поверхности пленки, при температурах 80–360 К (рис. 2).

## References

1. Sun X. Y. [at al.]. Single-Step Deposition of Cerium-Substituted Yttrium Iron Garnet for Monolithic On-Chip Optical Isolation // ACS Photonics. 2015. № 7 (2). P. 856–863.
2. Lage E. [at al.]. Temperature-dependent Faraday rotation and magnetization reorientation in cerium-substituted yttrium iron garnet thin films // APL Materials. 2017. № 3 (5). P. 036104.
3. Gomi M., Furuyama H., Abe M. Strong magneto-optical enhancement in highly Ce-substituted iron garnet films prepared by sputtering // Journal of Applied Physics. 1991. № 11 (70). P. 7065–7067.

© Масюгин А. Н., Бегешева О. Б., 2019

УДК 539.21:537.86

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ  $Tm_xMn_{1-x}S$  \***

М. Н. Ситников\*, А. М. Харьков, В. В. Мироненко, Г. Ю. Филиппсон

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

*Проведены исследования электрических свойств соединений с переменной валентностью  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0,15$ ) в области температур 80–600 К. Построены зависимости сопротивления и коэффициента Холла от температуры.*

*Ключевые слова: твердые растворы, сопротивление, коэффициент Холла.*

**ELECTRICAL PROPERTIES IN SEMICONDUCTORS  $Tm_xMn_{1-x}S$**

M. N. Sitnikov\*, A. M. Kharkov, V. V. Mironenko, G. Yu. Filipson

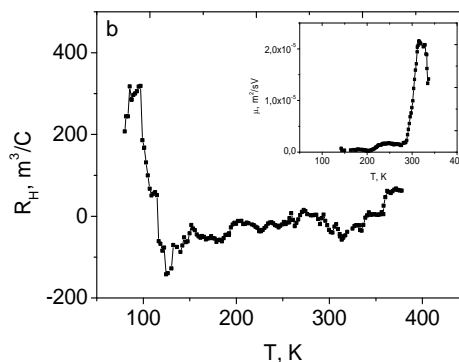
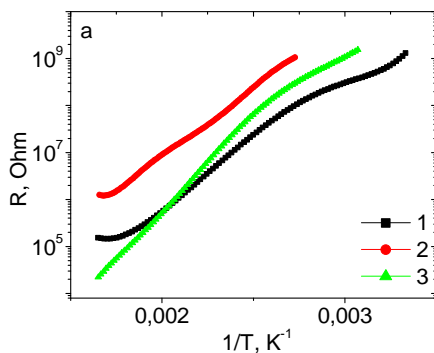
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 \*E-mail: kineru@mail.ru

*The electrical properties of compounds with variable valence  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0.15$ ) in the temperature range 80–600 K have been synthesized and studied. The dependence of the resistance and Hall coefficient on temperature are constructed.*

*Keywords: solid solutions, resistance, Hall coefficient.*

Материалы на основе твердых растворов  $Tm_xMn_{1-x}S$ , в перспективе могут использоваться для элементной базы в микроэлектронике. Существование локальных областей с электрической поляризацией может вызвать рассеяние носителей тока за счет спин-орбитального взаимодействия и спиновую поляризацию в парамагнитной области, в результате подвижность носителей тока будет зависеть от внешнего электрического и магнитного полей.

На рисунке, *a* изображены температурные зависимости сопротивления в интервале 300–600 К. Для всех трех составов характерно увеличение энергии активации примерно в два раза в интервале температур 340–370 К от  $\Delta E = 0,3–0,4$  eV до  $\Delta E = 0,6–0,8$  eV. В этом интервале температур меняется знак коэффициента Холла и соответственно тип носителей тока с отрицательного на положительный при нагревании (см. рисунок, *b*).



Логарифмическая зависимость сопротивления  $R$  от обратной температуры  $1/T$  для образцов  $Tm_xMn_{1-x}S$  с  $x = 0,05$  (1),  $0,1$  (2),  $0,15$  (3) (*a*). Температурная зависимость коэффициента Холла, измеренная в магнитном поле  $H = 8$  кЭ перпендикулярно току для образцов  $Tm_xMn_{1-x}S$  с  $x = 0,1$ .

Вставка: температурная зависимость подвижности электронов (носителей заряда) в магнитном поле  $H = 8$  кЭ для образцов  $Tm_xMn_{1-x}S$  с  $x = 0,1$  в интервале температур 80–400 К (*b*)

\*Работа поддержана грантом № 18-32-00079 Мол\_a.



Смена знака носителей тока также наблюдается ниже температуры перехода в магнитоупорядоченное состояние. Рост энергии активации связан со сдвигом химпотенциала от донорного уровня к акцепторному. Несовпадение знаков термоэдс и Холловского сопротивления вызвано увлечением электронов акустическими фононами, что обуславливает положительный знак термоэдс ниже  $T = 350$  К. Выход сопротивления на плато выше 580 К обусловлен насыщением примесной проводимости для  $x = 0,05, 0,1$ . Для состава с  $x = 0,15$  с широкой примесной подзоны насыщение наступает при более высокой температуре [1].

Влияние магнитного поля на транспортные характеристики определим из вольтамперных характеристик, измеренных без поля и в магнитном поле 8 кЭ, приложенном перпендикулярно току. Зависимость тока от напряжения нелинейная и сопротивление уменьшается с ростом электрического поля и увеличивается в магнитном поле в пределах одного процента для  $x = 0,05$ . Изменение сопротивления в магнитном поле достигает (5–7) % в  $Tm_{0,15}Mn_{0,85}S$  и резко возрастает до  $\Delta R / R = 0,35$  и  $1,05$  при  $T = 450$  для  $x = 0,1$  и  $0,15$ .

Подобный эффект магнитосопротивления наблюдался в поликристаллах халькогенида серебра и объясняется за счет неоднородности и дисперсией в функции распределения подвижности носителей, что приводит к Холловской проводимости от примесных центров [2]. Многократное рассеивание электронов в областях с низкой подвижностью в неоднородных

полупроводниках, приводит к индуцированному беспорядку, где свободные носители замораживаются в каналах с высокой подвижностью при низких температурах. Магнитосопротивление, индуцируемое беспорядком, резко зависит от температуры.

#### Библиографические ссылки

1. Исследование электрических и термоэлектрических свойств сульфидов  $Tm_xMn_{1-x}S$  / С. С. Аплеснин, О. Б. Романова, А. И. Галяс, В. В. Соколов // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 21–26.
2. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // Phys. Status Solidi B. 2019. № 10. P. 1900043.

#### References

1. Investigation of electrical and thermoelectric properties of sulfides  $Tm_xMn_{1-x}S$  / S. S. Aplesnin, O. B. Romanova, A. I. Galyas, V. V. Sokolov // FTT. 2016. Vol. 58. P. 21–26 (In Russ).
2. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $Tm_xMn_{1-x}S$  solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // Phys. Status Solidi B. 2019. № 10. P. 1900043.

© Ситников М. Н., Харьков А. М., Мироненко В. В., Филипсон Г. Ю., 2019

## СИНТЕЗ ТОНКИХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ ПЛЕНОК С КОНТРОЛИРУЕМЫМ РАЗМЕРОМ НАНОЧАСТИЦ $\text{Co}^*$

И. А. Тамбасов<sup>1\*</sup>, М. Н. Волочаев<sup>1</sup>, В. А. Федотов<sup>2</sup>, Е. В. Тамбасова<sup>2</sup>, М. О. Горнаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/38

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

\* E-mail: tambasov\_igor@mail.ru

*Тонкие нанокomпозитные  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  пленки были синтезированы с помощью твердофазной реакции в многослойных пленках  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Al}$  с толщиной  $\text{Co}_3\text{O}_4$  слоя 3 и 5 нм. Равномерно распределённые наночастицы  $\text{Co}$  в тонких нанокomпозитных пленках получены. Средний размер  $\text{Co}$  наночастиц был  $3\pm 0,4$  и  $4,2\pm 0,8$  нм.*

*Ключевые слова: нанокomпозитные пленки, твердофазный синтез,  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ , наночастицы  $\text{Co}$ .*

## SYNTHESIS OF THIN NANOCOMPOSITE $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ FILMS WITH CONTROLLED SIZE OF $\text{Co}$ NANOPARTICLES

I. A. Tambasov<sup>1\*</sup>, M. N. Volochaev<sup>1</sup>, V. A. Fedotov<sup>2</sup>, E. V. Tambasova<sup>2</sup>, M. O. Gornakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics SB RAS FRC KSC SB RAS  
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\* E-mail: tambasov\_igor@mail.ru

*Thin nanocomposite  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  films were synthesized by a solid-phase reaction in  $\text{Co}_3\text{O}_4 / \text{Al}$  multilayer films with a  $\text{Co}_3\text{O}_4$  layer thickness of 3 and 5 nm. Uniformly distributed  $\text{Co}$  nanoparticles in thin nanocomposite films were obtained. The average size of  $\text{Co}$  nanoparticles was  $3\pm 0.4$  and  $4.2\pm 0.8$  nm.*

*Keywords: nanocomposite films, solid-phase synthesis,  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}$  nanoparticles.*

Колоссальная часть неиспользованной тепловой энергии от промышленных производств и других областей жизнедеятельности людей рассеивается в окружающую среду. При этом часть этой тепловой энергии можно перевести в электрическую энергию с помощью термоэлектрических преобразователей. Стоит отметить, что самая значительная часть неиспользованной тепловой энергии находится в диапазоне температур до 200 °C [1].

Для эффективного преобразования тепловой энергии в электрическую необходимы материалы с высокими термоэлектрическими свойствами. Ключевыми свойствами являются наличие высокой дырочной или электронной проводимости, наличие высокого коэффициента Зеебека, а также наименьшего коэффициента теплопроводности в таких материалах [2]. Общей интегральной характеристикой термоэлектрических материалов является термоэлектрическая добротность.

Как показали недавние исследования [3; 4], материалы с высокими термоэлектрическими свойствами должны быть наноструктурированными. Это связано с тем, что за счет структурных особенностей можно изменять термоэлектрическую добротность. Структурные особенности могут выступать как центры рассеяния тепловых фононов и тем самым может снижаться коэффициент теплопроводности. В конечном счете, за счет снижения коэффициента теплопроводности увеличивается термоэлектрическая добротность

В рамках данной работы были синтезированы тонкие нанокomпозитные  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  пленки с хорошо контролируемыми размерами наночастиц  $\text{Co}$ . Такие тонкие  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  пленки являются модельной системой для исследования коэффициента теплопроводности в зависимости от размера наночастиц. Эти исследования крайне актуальны в рамках задачи по увеличению термоэлектрической добротности в наноструктурированных материалах.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Исследование коэффициента теплопроводности и структурных особенностей в тонких наноструктурированных оксидных пленках, перспективных для термоэлектрического применения» (проект № 18-42-243010) и стипендии Президента Российской Федерации (СП-2235.2019.1).

Синтез тонких Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> пленок заключался в получении слоя Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления кобальтовой мишени в атмосфере, состоящей из смеси газов аргон (70 %) – кислород (30 %). Далее осаждался слой алюминия с помощью магнетронного напыления в атмосфере чистого аргона. Были получены две системы с 20 парами Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (3 нм)/Al (8 нм) и 12 парами Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (5 нм)/Al (13 нм). Эти тонкопленочные системы отжигались в вакууме при температуре 700 °С в течение часа согласно данным [5].

Морфология и фазовый состав пленок были исследованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии при ускоряющем напряжении 110 кВ.

Впервые были полученные тонкие наноструктурированные Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> пленки с средним размером Co наночастиц 3±0,4 и 4.2±0,8 нм. Такие пленки позволят исследовать коэффициент теплопроводности в зависимости от размера наночастиц Co.

## References

1. Toshima N. Recent progress of organic and hybrid thermoelectric materials // *Synthetic Metals*. 2017. Vol. 225. P. 3–21.
2. Snyder G. J., Toberer E. S. Complex thermoelectric materials // *Nature Materials*. 2008. Vol. 7. P. 105–114.
3. He J., Tritt T. M. Advances in thermoelectric materials research: looking back and moving forward // *Science*. 2017. Vol. 357. P. 1369.
4. Extraordinary thermoelectric performance realized in n-type PbTe through multiphase nanostructure engineering / J. Zhang, D. Wu, D. S. He et al. // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29. 170314.
5. Thermite synthesis, structural and magnetic properties of Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite films / V. G. Myagkov, L. E. Bykova, V. S. Zhigalov et. al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 724. P. 820–826.

© Тамбасов И. А., Волочаев М. Н., Федотов В. А., Тамбасова Е. В., Горнаков М. О., 2019

УДК 535.015

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ ВЫСОКОДОБОТНЫХ ФИЛЬТРОВ ИЗ МАССИВОВ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН\***

А. Д. Утюшев<sup>1,2</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,3</sup>, В. С. Герасимов<sup>2,3</sup>, И. Л. Рассказов<sup>4</sup>, С. В. Карпов<sup>1,2,5,a</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

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

<sup>3</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>4</sup>Институт оптики, Рочестерский университет

США, 14627, штат Нью-Йорк, Рочестер, бульвар Джозефа Уилсона, 500

<sup>5</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

<sup>a</sup>E-mail: karpov@iph.krasn.ru

*Показано, что двумерные периодические структуры (ПС) из плазмонных и диэлектрических наночастиц могут служить в качестве управляющих оптических элементов в системах глобальной космической коммуникации с полосой пропускания менее 1 нм.*

*Ключевые слова: периодические структуры из наночастиц, рассеяние света, высокодобротный спектральный фильтр.*

**ENGINEERING NOVEL OPTICAL HIGH-Q NANOPARTICLE ARRAY FILTERS FOR A WIDE RANGE OF WAVELENGTHS**

A. D. Utyushev<sup>1,2</sup>, A. E. Ershov<sup>1,3</sup>, V. S. Gerasimov<sup>2,3</sup>, I. L. Rasskazov<sup>4</sup>, S. V. Karpov<sup>1,2,5,a</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>4</sup>Institute of Optics, University of Rochester, USA,

14627, New York, Rochester, Boulevard. Joseph Wilson, 500

<sup>5</sup>Kirensky Institute of Physics SB RAS

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>a</sup>E-mail: karpov@iph.krasn.ru

*We have shown that two-dimensional periodic structures (PS) composed of plasmonic and dielectric nanoparticles can serve as control optical elements in global space communication systems with a bandwidth of less than 1 nm.*

*Keywords: periodic structures of nanoparticles, light scattering, high-Q spectral filter.*

Не вызывает сомнения актуальность создания управляющих оптических элементов с полосой пропускания от видимого и телекоммуникационного до ближнего инфракрасного диапазона длин волн с возможностью пропускания через одну оптоволоконную линию связи большого количества независимых модулированных потоков излучения, отличающихся длиной волны. В этой связи обращают на себя внимание устройства, в виде одномерных (1D) или двумер-

ных (2D) периодических структур (ПС), состоящих из полностью плазмонных или диэлектрических наночастиц (НЧ). Новые идеи, лежащие в основе таких устройств, впервые предсказаны в теоретических исследованиях Маркеля и Шаца [1–3]. В соответствии с предсказаниями, такие ПС демонстрируют в спектрах поглощения сверхузкий резонанс, положение и добротность которого зависит от структуры ПС, материала и формы его частиц.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-240013, гранта Президента РФ, соглашения № 075-15-2019-676.

В работах [1–3] использовались плазмонные материалы – золото или серебро. Кроме того, сверхузкие структурные резонансы в ПС ранее наблюдались лишь в режиме пропускания излучения через ПС на определенной длине волны, что не позволяло использовать их для выделения из широкого спектра падающего излучения узкой спектральной области с требуемой длиной волны.

В рамках настоящей работы предлагается конструкция устройства, которое позволяет выделять излучение в режиме отражения из спектрального континуума, в пределах перестраиваемой сверхузкой спектральной линии и контролировать её положение с высокой добротностью.

Периодические структуры (ПС) из плазмонных и диэлектрических наночастиц (НЧ) в последние годы привлекают повышенное внимание благодаря их способности сочетать возбуждение поверхностных плазмонов (для плазмонных НЧ) или резонансов Ми (для диэлектрических НЧ) в отдельных наночастицах, а также проявлять коллективные эффекты, которые связаны с взаимодействием электромагнитных полей, создаваемых этими наночастицами. При определенном наборе параметров ПС (период, форма частиц, размер и материал), такие структуры порождают в спектре поглощения сверхузкие оптические резонансы, которые вызваны интерференцией полей отдельных частиц и появлением аномалии Рэлея [4].

Таким образом, резонансное поглощение порождается гибридной связью локализованных низкодобротных коллективных резонансов (КР) наночастиц и их нелокализованных взаимодействий, охватывающих всю ПС. При этом добротность таких резонансов (Q-фактор) в  $10^2$ – $10^3$  раз может превышать добротность резонансов отдельных частиц.

Другим важным достоинством, обсуждаемых в работе ПС, является использование диэлектрических материалов для наночастиц. Замена традиционных плазмонных материалов – золота, серебра и нитрида титана на диэлектрики позволяет существенно улучшить спектральные характеристики ПС.

Основными требованиями, предъявляемыми к ПС и типу используемых материалов наночастиц, является сочетание высокой действительной части показателя преломления  $\text{Re}(n)$  и ее низкой мнимой части  $\text{Im}(n)$  для различных спектральных диапазонов, что обеспечивает низкую диссипацию энергии внутри частиц.

Расчеты выполняются методом FDTD, который является одним из наиболее востребованных, экспериментально верифицированных вычислительных методов электродинамики, основанных на дискретизации уравнений Максвелла в дифференциальной форме [5]. Исследования выполнялись с ПС из наночастиц в виде нанодисков. Оказалось, что при высоте диска, равной его радиусу, добротность достигает максимума. Положение пика коллективного решеточ-

ного резонанса может настраиваться в пределах всей полосы пропускания путем изменения размерных параметров решетки (радиус  $R$ , высота  $H$  частиц и период решетки  $h$ ), а добротность резонанса контролируется изменением размеров нанодисков, где добротность  $Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  определяется отношением резонансной длины волны  $\lambda$  к ширине контура спектральной линии  $\Delta\lambda$  на полувысоте от размеров.

На основании полученных результатов данной работы можно сделать следующие выводы. Периодические структуры из диэлектрических наночастиц с коллективным решеточным резонансами могут быть использованы в режиме отражения в качестве селективных сверхузкополосных спектральных фильтров. Положение спектральных линий можно регулировать с помощью периода решетки. Полученные результаты позволяют определить оптимальный материал, как с учетом его оптических характеристик, так и условий эксплуатации.

Рассмотренные ПС в режиме отражения демонстрируют эффект оптической фильтрации с тонкой настройкой спектрального положения резонансной линии до требуемой длины волны путем наклона ПС по отношению к падающему излучению. Важной особенностью оптических свойств исследованных ПС является возможность управления положением выделяемой спектральной линии путем наклона ПС по отношению к падающему излучению.

Таким образом, показано, что исследуемые периодические структуры, могут использоваться в схеме отражения в качестве выделяющих сверхузкополосных перестраиваемых спектральных фильтров.

## References

1. Markel V. A. Divergence of dipole sums and the nature of non-Lorentzian exponentially narrow resonances in one-dimensional periodic arrays of nanospheres // *Journal of Phys. B: Atomic, molecular and optical physics*. 2005. Vol. 38. P. 115–121.
2. Zou S., Janel N., Schatz G. C. Silver nanoparticle array structures that produce remarkably narrow plasmon line shapes // *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 120. P. 10871–5.
3. Zou S., Schatz G. C. Narrow plasmonic/photonic extinction and scattering line shapes for one and two dimensional silver nanoparticle arrays // *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 121. P. 12606–12.
4. Wood R. W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum // *Proc. Phys. Soc. Lond.* 1902. Vol. 18. P. 269–275.
5. Finite-difference time-domain method [Electronic resource]. URL: <https://clck.ru/DWzUV> (access: 19.04.2018).

© Утюшев А. Д., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Рассказов И. Л., Карпов С. В., 2019

УДК 539.21:537.86

### ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ТОК И ТЕРМОЭДС В $Tm_xMn_{1-x}S$ \*

А. М. Харьков\*, М. Н. Ситников, У. И. Рыбина, М. Ю. Юхно

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: khark.anton@mail.ru

*Проведены исследования электрических свойств соединений с переменной валентностью  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0,15$ ) в области температур 80–600 К. Построены зависимости пирозлектрического тока и коэффициента термоЭДС от температуры.*

*Ключевые слова: твердые растворы, термоЭДС, термоэмиссионный ток.*

### THERMIONIC CURRENT AND THE THERMOPOWER IN $Tm_xMn_{1-x}S$

A. M. Kharkov\*, M. N. Sitnikov, U. I. Rybina, M. Yu. Yukhno

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: khark.anton@mail.ru

*The electrical properties of compounds with variable valence  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0.15$ ) in the temperature range 80–600 K have been synthesized and studied. The dependence of the pyroelectric current and the thermopower coefficient on temperature is constructed.*

*Keywords: solid solutions, thermopower, thermionic current.*

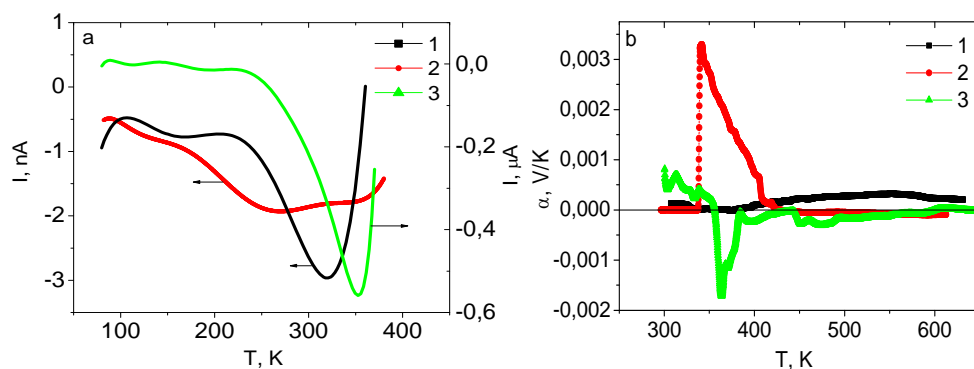
Материалы на основе твердых растворов  $Tm_xMn_{1-x}S$ , в перспективе могут использоваться для элементной базы в микроэлектронике. Нестехиометрическое замещение ионов марганца тупием образует электрически неоднородные состояния в образце. Гибридизация волновых функций катионов сопровождается с участием иона серы, что приведет к зарядовой щели. Избыточный заряд на  $Tm^{3+}$  компенсируется смещением анионов и свободными носителями тока. На границе раздела нанообластей  $TmS$  возникает электрическая поляризация с  $p$ - $n$ -переходом. При поглощении фононов электронами в области  $p$ - $n$ -перехода возникнет термоэмиссионный ток. Ток в нулевом электрическом поле измерен на электрометре 6517В/Е. На рисунке, *a* представлен термоэмиссионный ток для трех составов в интервале температур 80–380 К. Для двух составов  $x = 0,05$  и  $0,1$  термоэмиссионный ток достигает максимальной величины при температуре конденсации ИК моды на частоте  $\omega_1 = 3116 \text{ см}^{-1}$  и второй максимум в интервале 325–350 К. С ростом концентрации тупия наибольший ток наблюдается при температуре конденсации моды на частоте  $1276 \text{ см}^{-1}$  [1]. Ток, в отсутствие внешнего напряжения, может быть вызван градиентом температуры (термоэдс), изменением электрической поляризации (пироток), пьезоэлектрический ток (при деформации образца возникает разность потенциалов) и термоэмиссионный ток. Температурная зависимость термоЭДС, изображенная на рисунке, *b*, отличается

по знаку и по поведению от термоэмиссионного тока. Для состава с  $x = 0,15$  ток меняет знак при  $T = 255$  К при нагревании с положительного на отрицательный, знак термоЭДС меняется при  $T = 350$  К. Температуры экстремумов термоэмиссионного тока и термоЭДС близки по значению и связаны с делокализацией электронов, взаимодействующих с оптическими модами колебаний.

Дополнительные минимумы в термоЭДС в области деформации решетки при  $T = 475$ – $485$  К обусловлены диффузией электронов в результате сдвига химпотенциала на границах образца при наличии градиента температур.

Вклад пиротока оценивали из измерения тока от времени после приложения к образцу электрического напряжения в течении пяти минут без магнитного поля и в магнитном поле. Для состава с  $x = 0,1$  величина тока меньше наноампера. Ниже температуры 350 К направления тока и приложенного электрического поля совпадают, магнитное поле меняет величину тока. Выше 350 К знаки тока и индуцированной поляризации не зависят от переключения электрического поля, но меняются в магнитном поле для  $x = 0,1$  и обусловлены конкуренцией токов деполяризации и термоЭДС. Индуцированная поляризация релаксирует в течение одной секунды. Для состава с  $x = 0,1$  выше  $T = 350$  К поляризация уменьшается, уменьшается пироток, в результате ток в магнитном поле меняет знак.

\*Работа поддержана грантом № 18-32-00079 Мол\_а.



Температурная зависимость пироэлектрического тока (a) и коэффициента термоэдс  $\alpha(T)$  (b) для образцов  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $x = 0,05$  (1), 0,1 (2), 0,15 (3)

В  $\text{Tm}_{0,15}\text{Mn}_{0,85}\text{S}$  внешнее электрическое поле приводит к переключению поляризации и к уменьшению тока, в случае несовпадения векторов поляризации и внешнего электрического поля. Обнаруженные свойства объясняются на основе эффекта Максвелла–Вагнера в неоднородной смеси [2].

#### Библиографические ссылки

1. Исследование электрических и термоэлектрических свойств сульфидов  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  / С. С. Аплеснин, О. Б. Романова, А. И. Галяс, В. В. Соколов // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 21–26.

2. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution / S. S. Aplesnin,

M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // Phys. Status Solidi B. 2019. № 10. P. 1900043.

#### References

1. Investigation of electrical and thermoelectric properties of sulfides  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  // S. S. Aplesnin, O. B. Romanova, A. I. Galyas // FTT. 2016. Vol. 58. P. 21–26 (In Russ).

2. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // Phys. Status Solidi B. 2019. № 10. P. 1900043.

© Харьков А. М., Ситников М. Н., Рыбина У. И., Южно М. Ю., 2019

УДК 53.086

## ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

М. С. Щеглова<sup>1\*</sup>, Ю. Ю. Балашов<sup>1</sup>, М. Н. Волочаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/12

\*E-mail: Sheglova.marina@bk.ru

*Рассмотрены методы цифровой обработки, фильтрации и анализа изображений высокого разрешения (изображение кристаллической решетки), полученных на просвечивающем электронном микроскопе, с помощью функции быстрого преобразования Фурье.*

*Ключевые слова: просвечивающая электронная микроскопия, быстрое преобразование Фурье, изображения высокого разрешения.*

## FAST FOURIER TRANSFORM APPLICATION FOR FILTRATION AND ANALYSIS OF HIGH RESOLUTION ELECTRON MICROSCOPY IMAGES

M. S. Shcheglova<sup>1\*</sup>, Yu. Yu. Balashov<sup>1</sup>, M. N. Volochaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS  
50/12, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

\*E-mail: Sheglova.marina@bk.ru

*We report about the methods of digital processing, filtering and analysis of high-resolution transmission electron microscopy images (crystal lattice images) using the fast Fourier transform function.*

*Keywords: transmission electron microscopy, fast Fourier transform, high-resolution images.*

Одной из задач современного материаловедения является разработка материалов, в том числе и для авиакосмической отрасли с заданными свойствами, которые напрямую зависят от их структурных характеристик на различных масштабных уровнях, вплоть до атомного уровня. Без понимания процессов, происходящих в материале на микро- и мезоуровнях, зачастую невозможно понять причину тех или иных эффектов. Основным инструментом прямого исследования структуры различных материалов является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Методы наблюдения и исследования изображений кристаллической решетки материалов с помощью просвечивающего электронного микроскопа называются электронной микроскопией высокого разрешения (ВРЭМ) [1]. В просвечивающей электронной микроскопии очень важна качественная подготовка образцов, особенно если требуется получить снимки высокого разрешения. Образцы должны иметь толщину не более 20 нм (в идеальном случае несколько атомных слоев) и минимум дефектов и аморфизированного слоя, внесенного пробоподготовкой. Современные микроскопы, оснащенные катодом с полевой

эмиссией, монохроматором и корректорами сферических aberrаций, позволяют получить изображение атомной решетки с суб-ангстремным разрешением. Однако из-за большой стоимости и высоких требований к эксплуатации их себе может позволить далеко не каждый научный центр. Классические же просвечивающие электронные микроскопы с вольфрамовым либо гексаборид-лантановым катодом обладают разрешением по линиям порядка 2 Å для микроскопов с ускоряющим напряжением 120 кВ (Hitachi HT 7700) и порядка 1,4 Å для микроскопов с ускоряющим напряжением 200 кВ (JEOL JEM-2100). При этом такое разрешение получают на идеально подготовленных тест-объектах (обычно тонкие монокристаллические фольги золота) при идеальных условиях съемки. Реальное разрешение, получаемое на большинстве образцов, как правило, в два раза хуже. При съемке на предельных увеличениях (поскольку только на них видно изображение атомной решетки) интенсивность освещения чрезвычайно слабая, поэтому изображения сильно зашумлены так, что их анализ практически невозможен. В данном случае необходима дальнейшая цифровая обработка снимков.



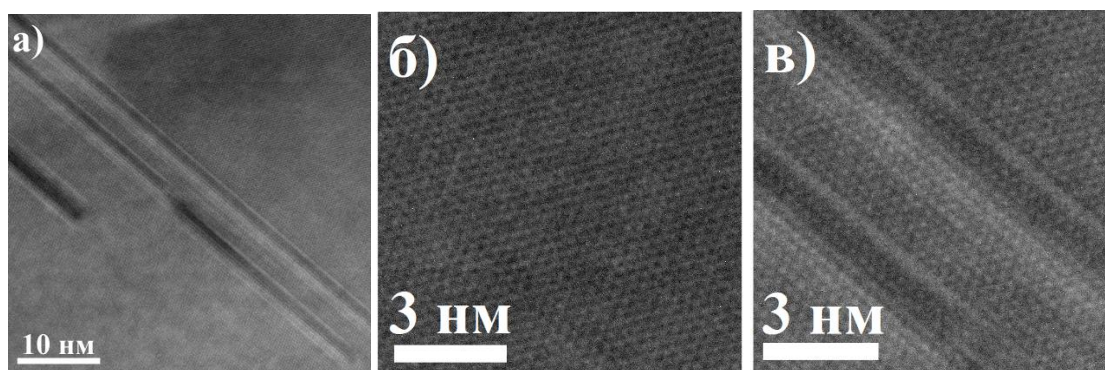


Рис. 1. Оригинальный ВРЭМ снимок кремния (110), полученный на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi HT 7700 (а), его увеличенные фрагменты (б, в)

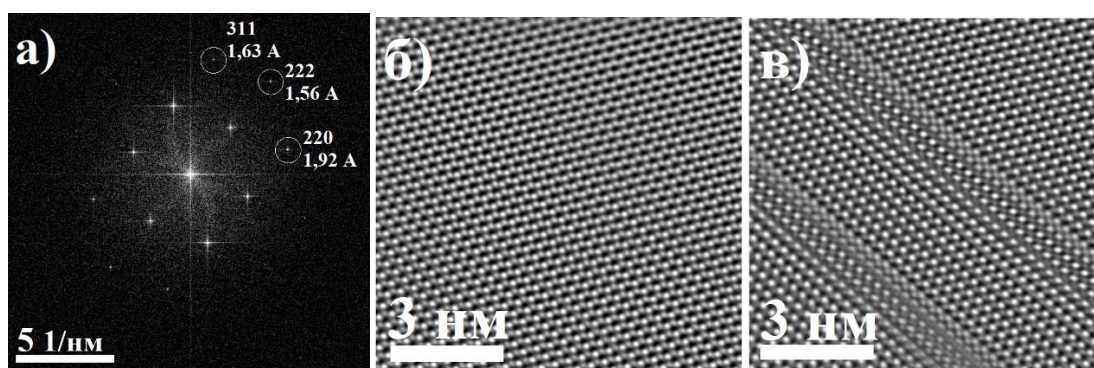


Рис. 2. Фурье-изображение снимка, представленного на рис. 1 (а), увеличенные фрагменты, изображенные на рис. 1 после фильтрации (б, в)

Отличным инструментом является метод фильтрации от шумов Фурье-образа изображения и обратного Фурье-преобразования отфильтрованного образа для получения чистого изображения кристаллической решетки.

Такой метод обработки изображений, называемый быстрое преобразование Фурье (Fast Fourier Transform) [2], доступен как в специализированных программах для просвечивающих электронных микроскопов (Digital Micrograph), так и в программах открытого доступа (ImageJ).

В настоящей работе на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi HT 7700 были получены ВРЭМ изображения кристаллической решетки зерен кремния с ориентацией (110) в сплаве силумин (Al – 89 % Si – 11 %), подвергнутого закалке и старению.

На рис. 1, а приведен оригинальный снимок высокого разрешения, на котором наблюдаются страйп-дефекты в кремнии, на рис. 1, б и рис. 1, в показаны увеличенные фрагменты бездефектной области и центральной области снимка с двумя дефектами.

Снимок был получен на максимальном увеличении с выдержкой в 4,5 с. Из-за большого количества шумов, обусловленных крайне низкой интенсивностью освещения, анализ и интерпретация таких снимков практически невозможны без применения Фурье-преобразования и его дальнейшей фильтрации.

На рис. 2, а приведено Фурье-изображение снимка (рис. 1, а), полученное в программе ImageJ, на котором видны точки (рефлексы) соответствующие плоскостям кристаллической решетки. По сути Фурье-изображение является аналогом дифракционной картины электронов, по которому также можно определять расстояния и углы между кристаллографическими плоскостями, определять фазовый состав на атомном уровне. По Фурье-изображению видно, что разрешились даже плоскости (311) и (222), расстояние между которыми менее 2 Å, что говорит о высоком качестве аппаратуры (электронного микроскопа).

На рис. 2, б и в приведены те же фрагменты снимка, что и на рис. 1, б и в после применения фильтрации Фурье-изображения, которая заключается в удалении всех областей, кроме дифрагированных рефлексов, центральный рефлекс также удаляется. После данной процедуры выполняется обратное Фурье-преобразование, и в результате получаем чистое изображение кристаллической решетки, которое уже с легкостью можно анализировать на предмет типов и природы дефектов.

#### Библиографические ссылки

1. Штанский Д. В. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения в нанотехнологических исследованиях // Российский химический журнал. Т. 46, № 5. С. 81–89.

2. Анализ состава когерентных нановключений твердых растворов по высокоразрешающим электронно-микроскопическим изображениям / И. П. Сошников, О. М. Горбенко, А. О. Голубок, Н. Н. Леденцов // Физика и техника полупроводников. Т. 35, вып. 3. С. 361–366.

#### References

1. Shtanskij D. V. *Prosvechivajushhaja jelektronnaja mikroskopija vysokogo razreshenija v nanotehnologicheskijh issledovanijah* [High Resolution Transmission Electron Microscopy in Nanotechnology

Research] // Rossijskij himicheskij zhurnal. Vol. 46, № 5. P. 81–89.

2. Analysis of the composition of coherent nano-inclusions of solid solutions by high-resolution electron microscopic images / I. P. Soshnikov, O. M. Gorbenko, A. O. Golubok, N. N. Ledencov // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. Vol. 35, № 3. P. 361–366 (In Russ.).

© Щеглова М. С., Балашов Ю. Ю.,  
Волочаев М. Н., 2019



**Секция**

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
(ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА,  
ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ,  
РЕОЛОГИЯ)»**

УДК 620.1.05

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТИТАНОВОГО ШАРА ДЛЯ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА

Н. Н. Автономов, А. В. Тололо

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 8350474@gmail.com

*Рассматривается возможность использования титана в качестве материала шарового индентора с целью увеличения чувствительности измерений момента перехода исследуемого материала из упругого в пластическое состояние.*

*Ключевые слова:* вдавливание шарового индентора, метод конечных элементов.

## USE OF A TITANIUM BALL TO INDENTE THE RESEARCH MATERIAL

N. N. Avtonomov, A. V. Tololo

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 8350474@gmail.com

*The article discusses the possibility of using titanium as a material of a spherical indenter in order to increase the sensitivity of measurements of the moment of transition of the studied material from elastic to plastic state.*

*Keywords:* automated ball indentation, finite elements method.

Одним из способов получения механических свойств материала деталей конструкций без вырезки образцов для испытаний на разрывных машинах является вдавливание шарового индентора в их поверхность. При определении предела текучести важным является момент перехода материала из упругого в пластическое состояние.

Проблема заключается в том, что этот момент наступает при очень низких величинах нагрузки и глубины вдавливания индентора и его очень сложно отследить. Необходимо сделать какие-то шаги по увеличению чувствительности измерительной системы. В качестве одного из вариантов было предложено использовать для вдавливания шар не из стали, а из титанового сплава. Стальные шаровые инденторы имеют высокие модули упругости  $E$  в диапазоне  $(2...2,2) \cdot 10^5$  МПа. При вдавливании в материал образца с низким модулем упругости происходит быстрое нарастание интенсивности напряжений  $\sigma_i$  при небольшой нагрузке на индентор.

Для исследования контакта шара и образца была использована программа ANSYS Multiphysics 15.0 реализующая метод конечных элементов для решения задач теории упругости и пластичности с учетом контактного взаимодейст-

вия двух тел [1–4]. В расчетах смоделированы шары диаметрами 10 мм со свойствами стали ШХ15 и титана ВТ5. В качестве материала для образца использован алюминиевый сплав ВД1. Максимальная нагрузка была установлена в 20Н.

В процессе решения контактной задачи были получены графики зависимости глубины вдавливания от нагрузки для титанового и стального шаров (см. рисунок).

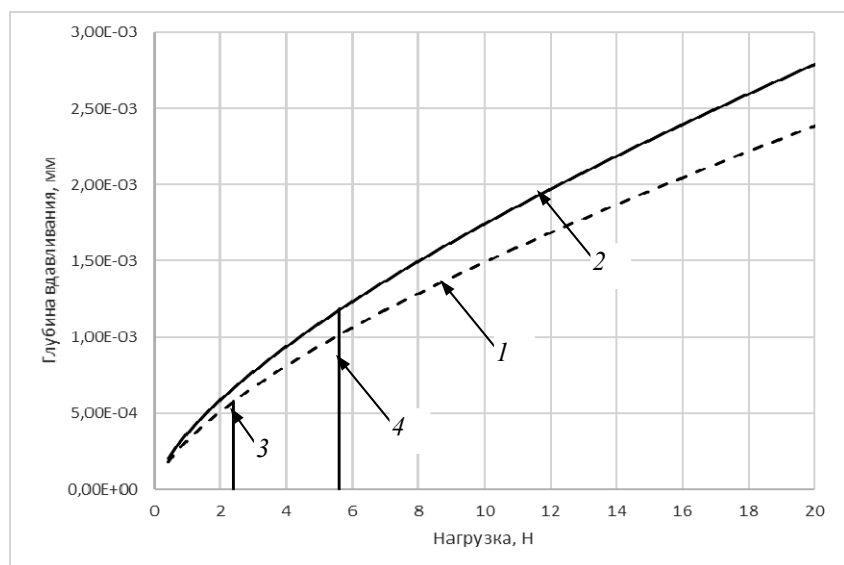


График зависимости глубины вдавливания от нагрузки для материалов: стали ШХ15(1), титана ВТ1(2) и соответствующих им моментов достижения  $F_i$ : 3 и 4

По рисунку видно, что для индентора из титана ВТ5 по сравнению со сталью ШХ15 расширяется диапазон упругого контакта как по уровню нагрузки, так и по уровню глубины вдавливания.

Переход материала образца из алюминиевого сплава в пластическое состояние под титановым шаром на глубине примерно 0,4 от радиуса площадки контакта происходит при большей нагрузке вследствие большей податливости контактирующей пары «алюминиевый сплав – титан» и увеличенной площадки контакта по сравнению с парой «алюминиевый сплав – сталь». Увеличилась и глубина внедрения индентора, при которой происходит этот переход. Чувствительность измерительной системы увеличилась примерно в 2 раза.

#### Библиографические ссылки

1. Басов К. А. ANSYS в руках инженера. М. : КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
2. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров : справ. пособие. М. : Машиностроение-1, 2004. 512 с.
3. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М. : Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

4. Решение контактных задач в Ansys 6.1. М. : Cadfem. 2003. 127 с.
5. Автономов Н. Н., Тололо А. В., Измерительная головка к твердомеру Бринелля // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 73–76.

#### References

1. Basov K. A. *ANSYS v rukakh inzhenera* [ANSYS in the hands of the engineer]. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 2002, 224 p.
2. Chigarev A. V., Kravchuk A. S., Smalyuk A. F. *ANSYS dlja inzhenerov. Spravochnoe posobie* [ANSYS to engineers. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004, 512 p.
3. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. *ANSYS v rukah inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of the engineer. A practical guide]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 272 p.
4. Reshenie kontaktnuh zadach v ansys 6.1. [Contact problem solution in Ansys 6.1]. Moscow, Cadfem, 2003, 127 p.
5. Avtonomov N. N., Tololo A. V. [Measuring head for Brinel's durometer] // *Vestnik SibGAU*. 2007. № 2. P. 73–76.

© Автономов Н. Н., Тололо А. В., 2019

## ОБ ОДНОНАПРАВЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ

В. К. Андреев, И. В. Степанова\*

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 \*E-mail: stepiv@icm.krasn.ru

*Изучается однонаправленное течение бинарной смеси в плоском канале с твердыми стенками. Построено новое точное решение обратной задачи, которое может быть использовано для описания процессов тепло-массообмена в экспериментальных установках и системах отвода тепла, в том числе и в спутниковых аппаратах.*

*Ключевые слова: конвекция, бинарная смесь, уравнения Обербека–Буссинеска, точные решения, устойчивость.*

## ON UNIDIRECTIONAL MOTION OF BINARY MIXTURE

V. K. Andreev, I. V. Stepanova\*

Institute of Computational Modeling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
 \*E-mail: stepiv@icm.krasn.ru

*We study a unidirectional flow of a binary mixture in a horizontal channel with rigid walls. A new exact solution of the inverse problem is constructed. It describes heat and mass transfer in experimental setups and heat rejection systems, including satellite devices.*

*Keywords: convection, binary mixture, Oberbeck–Boussinesque equations, exact solutions, stability.*

**Введение.** Работа посвящена построению и анализу решения стационарных и нестационарных уравнений Обербека–Буссинеска, которое описывает однонаправленное движение бинарной смеси под действием горизонтальных градиентов температуры и концентрации, а также заданного расхода смеси через поперечное сечение слоя. Учет последнего порождает обратную задачу для поиска продольного градиента давления, достаточного для прокачивания заданного расхода бинарной смеси. Существенным моментом при построении решения является линейность функций температуры и концентрации относительно горизонтальной координаты. Впервые решения такого типа были описаны в работе [1] для описания течения однородной жидкости в бесконечном горизонтальном слое под действием продольного градиента температуры. Интерес к таким течениям связан не только с их геофизическими приложениями. Оказывается, подобного рода течения реализуются в задачах испарительной конвекции, которые ставятся при анализе работы охлаждающей системы различных установок, в том числе спутниковых систем [2].

**Анализ нестационарного и стационарного режимов.** Совместность изучаемых уравнений исследована в работе [3]. Показано, что если температура представима в виде полинома по степеням горизонтальной координаты, то это могут быть многочлены степени не выше третьей.

В представленной работе рассматривается случай линейной зависимости температуры от продольной

координаты и произвольной – от времени и оставшейся пространственной координаты. Поле скорости имеет одну компоненту, направление которой перпендикулярно действию силы тяжести. В уравнении на концентрацию легкой компоненты учитывается эффект термодиффузии – изменения концентрации смеси под действием градиента температуры.

Для построенного стационарного решения показано, что в зависимости от того, какой механизм течения является определяющим (тепловая нагрузка на стенках или заданный расход), возможно как формирование профиля скорости, близкого к течению Пуазейля, так и возникновение зон возвратного течения, когда абсолютное значение скорости достигает выраженного максимума в центре слоя или ее распределение более равномерно. Проанализировано влияние значения задаваемого расхода на продольный градиент давления, скорость смеси и ее разделение на компоненты. Показано, что при увеличении расхода градиент давления уменьшается, что ведет к увеличению скорости и немонотонности профиля концентрации.

Нестационарное решение линейной части задачи строится посредством преобразования Лапласа и сведения поставленной начально-краевой задачи к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений для нахождения образов по Лапласу от искомым функций. Восстановление неизвестных функций по их образам по Лапласу производится с помощью численной процедуры, описанной в [4]. Для нестационарного решения доказана его стабили-

зация путем вычисления пределов изображений по Лапласу от соответствующих искомым функций при выполнении ограничений на входные данные. Сформулировано условие, при выполнении которого нестационарное решение выходит на стационарный режим. Это условие связано именно с неоднородностью жидкости, для гомогенной жидкости таких ограничений нет. Доказанное утверждение о сходимости проиллюстрировано для нестационарного поля скорости, рассчитанного по градиенту температуры на нижней стенке в виде убывающей функции на больших временах. Приведен контрпример, когда ограничения на входные данные задачи не выполнены и сходимости к стационарному решению нет. Показана возможность управления движением смеси с помощью включения и выключения тепловой нагрузки на стенке. Построены профили скорости в зависимости от расхода, задаваемого убывающей функцией времени. Работа обобщает некоторые результаты статьи [5], полученные для однородных жидкостей, на случай движения бинарных смесей.

#### Библиографические ссылки

1. Остроумов Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М. : Гостехиздат, 1952. 256 с.
2. Бекежанова В. Б., Гончарова О. Н. Задачи испарительной конвекции (обзор) // ПММ. 2018. Т. 82, № 2. С. 219–260.
3. Андреев В. К., Степанова И. В. Об условиях существования однонаправленных движений бинарных

смесей в модели Обербека–Буссинеска // СибЖИМ. 2019. Т. 22, № 2 (78). С. 3–12.

4. Hoog F.R., Knight J. H., Stokes A. N. An improved method for numerical inversion of Laplace transform // SIAM J. Sci. Stat. Comp. 1982. № 3. P. 357–366.

5. Пухначев В. В. Нестационарные аналоги решения Бириха // Изв. АлтГУ: математика и механика. 2011. № 1-2 (69). С. 62–69.

#### References

1. Ostroumov G. A. Free convection in inertial. Moscow, Gostechizdat, 1952. 256 p.

2. Bekezhanova V. B., Goncharova O. N. Problems of evaporation convection (review) // Prikl. Mat. and Mech. 2018. Vol. 82, № 2. P. 219–260 (in Russ.).

3. Andreev V. K., Stepanova I. V. On condition of existence of unidirectional motions of binary mixtures in Oberbeck-Boussinesque model // Siberian Journal of applied and industrial mathematics. 2019. Vol. 13 (2). P. 185–193.

4. Hoog F.R., Knight J. H., Stokes A. N. An improved method for numerical inversion of Laplace transform // SIAM J. Sci. Stat. Comp. 1982. № 3. P. 357–366.

5. Pukhnachev V. V. Nonstationary analogs of Birikh solutions. // Izvestiya of Altai State University. Mathematics and Mechanics. 2011. № 1–2 (69). P. 62–69 (in Russ.)

© Андреев В. К., Степанова И. В., 2019

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ\***

М. П. Варыгина, И. В. Смолехо

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 E-mail: vmp@icm.krasn.ru

*Численно исследуются процессы распространения волн в блочных средах с микроразрушенными прослойками. Представлены результаты расчетов для блочных сред с различной толщиной прослоек.*

*Ключевые слова: блочная среда, трещиноватые прослойки, распространение волн.*

**NUMERICAL MODELING**

M. P. Varygina, I. V. Smolekho

Institute of Computational Modeling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
 E-mail: vmp@icm.krasn.ru

*Numerical modeling of processes of wave propagation in block media with microfractured interlayers is studied. Results of computations for block media with various interlayer thickness are presented.*

*Keywords: block medium, fractured interlayers, waves propagation.*

Исследование волновых процессов в структурно-неоднородных средах представляет практический интерес в аэрокосмической промышленности, сейсморазведке, строительстве и других отраслях. Микроразрушенная среда рассматривается как набор упругих блоков, соединенных между собой прослойками с различными механическими параметрами. Предполагается, что трещина возникает и распространяется исключительно в прослойках, за счет того, что материал прослойки более податлив по сравнению с материалом блока.

Блочная структура среды рассматривается в нескольких работах, посвященных моделированию динамических процессов трения и проскальзывания на контактных границах [1] и сред с упругими, вязкоупругими, упругопластическими и флюидонасыщенными прослойками [2; 3].

Поведение материала блока описывается системой уравнений однородной изотропной упругой среды. При моделировании распространения продольных

волн прослойка считается упругой до достижения уровня критической деформации. Когда деформация достигает критического уровня, возникает трещина, а взаимодействие блоков описывается с помощью реологической схемы с упругой пружиной и жестким контактом (рис. 1 (слева)). Жесткий контакт используется для моделирования различного сопротивления растяжению и сжатию. Для моделирования вязких диссипативных эффектов при распространении поперечных волн в прослойках применяется вязкоупругая схема Поинтинга–Томсона (рис. 1 (справа)).

Алгоритм численного решения задачи основан на методе двуциклического расщепления по пространственным переменным. На этапах расщепления метода используется монотонная разностная ENO-схема с предельной реконструкцией решения [4] для расчета блоков. Для численного решения уравнений в прослойках применяется метод Иванова с возможностью предварительного задания искусственной диссипации энергии [5].

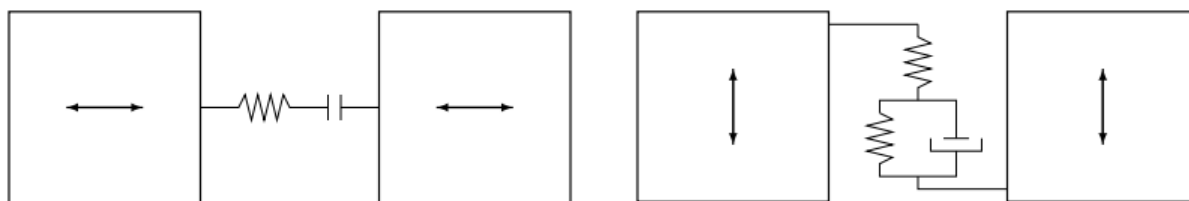


Рис. 1. Реологическая схема микроразрушенной прослойки: слева – для продольных волн; справа – для поперечных волн

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00100).



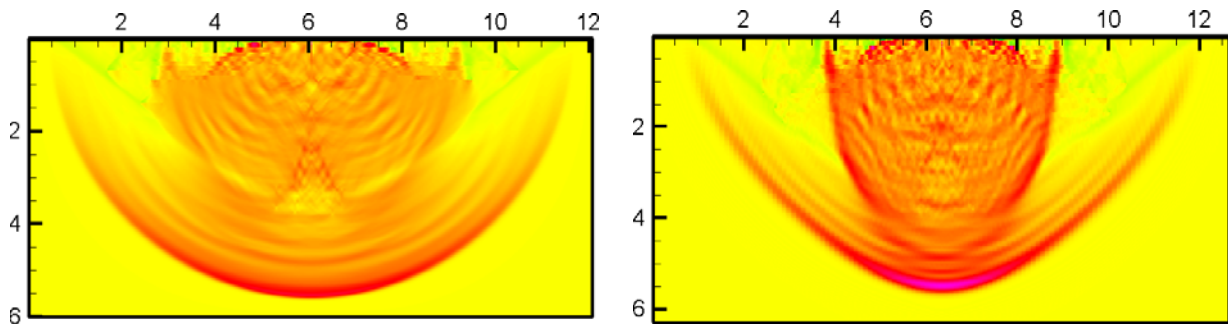


Рис. 2. Численное решение задачи распространения волн в блочных средах с микропоразрушенными прослойками: *слева* – тонкая прослойка (0,2 мм), *справа* – толстая прослойка (5 мм)

Рассматриваемый метод двуциклического расщепления обеспечивает устойчивость численного решения при выполнении условия устойчивости Куранта–Фридрихса–Леви. Параллелизация вычислений выполнена на этапе расщепления задачи по пространственным переменным с использованием технологии CUDA (Compute Unified Device Architecture) для суперкомпьютеров с графической архитектурой.

На рис. 2 представлено численное решение задачи распространения волн в блочной среде, вызванных импульсным источником. Среда состоит из  $121 \times 60$  квадратных блоков со стороной 10 см. Для аппроксимации блоков используется  $20 \times 20$  конечно-разностная схема с шагом 5 мм. В центре верхней границы задается источник, генерирующий волны – импульс Рикера с частотой 50 Гц. Правая и левая границы – не отражающие. Нижняя граница закреплена. Расчеты проведены для сред с различной толщиной прослойки: 0,2 мм (тонкие прослойки) и 5 мм (толстые прослойки). Проведенная серия вычислительных экспериментов показала влияние толщины прослойки на волновую картину в задачах о динамических импульсных нагрузках. Для тонких прослоек волновые фронты круглые, а при увеличении толщины прослойки, волновые фронты становятся эллиптическими.

#### Библиографические ссылки

1. Nikitin I. S. Dynamic models of layered and block media with slip, friction and separation // *Mechanics of Solids*. 2008. Vol. 43. № 4. P. 652–661.
2. Varygina M. Numerical Solution of Dynamic Problems in Block Media with Thin Interlayers on Supercomputers with GPUs. *Numerical Analysis and Its Applications, Lecture Notes in Computer Science*, 8236. 2013. P. 517–523.
3. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Numerical algorithm based on implicit finite-difference schemes for

analysis of dynamic processes in blocky media // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling*. 2018. Vol. 33, iss. 2. P. 111–121.

4. Kulikovskii A. G., Pogorelov N. V., Semenov A. Yu. *Mathematical Aspects of Numerical Solution of Hyperbolic Systems. Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics*, 118. 2001.

5. Численное решение динамических задач упругопластического деформирования твердых тел / Г. В. Иванов, Ю. М. Волчков, И. О. Богульский и др. Новосибирск : Сиб. универ. изд-во, 2002. 352 с.

#### References

1. Nikitin I. S. Dynamic models of layered and block media with slip, friction and separation // *Mechanics of Solids*. 2008. Vol. 43. № 4. P. 652–661.
2. Varygina M. Numerical Solution of Dynamic Problems in Block Media with Thin Interlayers on Supercomputers with GPUs. *Numerical Analysis and Its Applications, Lecture Notes in Computer Science*, 8236. 2013. P. 517–523.
3. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Numerical algorithm based on implicit finite-difference schemes for analysis of dynamic processes in blocky media // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling*. 2018. Vol. 33, iss. 2. P. 111–121.
4. Kulikovskii A. G., Pogorelov N. V., Semenov A. Yu. *Mathematical Aspects of Numerical Solution of Hyperbolic Systems. Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics*, 118. 2001.
5. Численное решение динамических задач упругопластического деформирования твердых тел [Numerical Solution of Dynamical Problems of Viscoelastic Deformation of Solids] / G. V. Ivanov, Yu. M. Volchkov, I. O. Bogul'skiy et al. *Novosibirsk : Sib. Univ. Izdat.*, 2002. 352 p. (In Russ.)

© Варыгина М. П., Смолехо И. В., 2019

**ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА В ТРУБЕ\***

А. В. Вяткин, Е. В. Кучунова\*

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 \*E-mail: HKuchunova@sfu-kras.ru

*Представлена параллельная реализация численного метода для моделирования трехмерного течения вязкого теплопроводного газа в трубе и ее окрестности на основе решения полной системы уравнений Навье–Стокса.*

*Ключевые слова: уравнение Навье–Стокса, полулагранжевые методы, метод конечных элементов, параллельные алгоритмы, MPI.*

**PARALLEL REALIZATION OF NUMMERICAL METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL MODELING OF VISCOUS HEAT-CONDUCTING GAS MOTION NEAR TUBE**

A. V. Vyatkin, E. V. Kuchunova\*

Institute of Computational Modeling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
 \*E-mail: HKuchunova@sfu-kras.ru

*We present parallel realization of numerical method for three-dimensional modelling of viscous heat-conducting gas motion near tube. It based on solving of full system of three-dimensional Navier–Stokes equations.*

*Keywords: Navier–Stokes equation, semi-Lagrangian method, finite element method, MPI, multiprocessor computer system*

В настоящее время наиболее точная физико-математическая модель, описывающая течение сжимаемого вязкого теплопроводного газа, основана на полной системе уравнений Навье–Стокса [1]

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ \rho \frac{du}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{dv}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{dw}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}. \end{aligned}$$

$$\rho \frac{de}{dt} + P \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + \Phi.$$

Здесь  $d(\cdot)/dt$  – субстанциональная, или полная, производная, т. е.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y}.$$

Существует большое число численных методов, предназначенных для решения системы уравнений Навье–Стокса, которые обладают различными преимуществами. Среди них можно выделить технологию, основанную на объединении полулагранжевого метода и метода конечных элементов. Полулагранжевый подход используется для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях Навье–Стокса. Дискретизация по пространству остальных слагаемых уравнений Навье–Стокса на каждом временном слое проводится методом конечных элементов с кусочно-трилинейными базисными функциями и применением квадратурных формул [2].

Рассмотрена трехмерная по пространству расчетная область, охватывающая пространство внутри и снаружи трубы. Разработана параллельная версия алгоритма, основанная на технологии передачи сообщений MPI. Декомпозиция расчетной области осуществлена по вычислительным узлам с использованием разбиения вычислительной области на полосы, количество которых определяется количеством используемых вычислительных узлов.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-41-243006: «Численное моделирование формирования квазиустойчивых фигур, образованных многокомпонентной газовой смесью, вытекающей из промышленной дымовой трубы».

В связи с зависимостью по данным с предыдущего временного слоя, в каждой полосе выделены теневые грани для обмена значениями между соседними вычислительными узлами. Обмен значениями в теневых гранях осуществляется после каждого шага по времени при помощи пересылки сообщений. Проведенные вычислительные эксперименты подтверждают первый порядок сходимости численного решения к точному решению. Исследованный метод может быть применен для численного решения системы уравнений Навье–Стокса, описывающей обтекание объекта воздушным потоком.

#### Библиографические ссылки

1. Алоян А. Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере : курс лекций. М. : ИВМ РАН, 2002. 201с.

2. Шайдуров В. В., Щепановская Г. И., Якубович М. В. Численное моделирование течений вязкого теплопроводного газа в канале // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 4. С. 77–90.

#### References

1. Aloyan A. E. [Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere: A course of lectures]. Moscow, IVM RAN, 2002. 201 p.

2. Shaydurov V. V., Shchepanovskaya G. I., Yakubovich M. V. Chislennoe modelirovanie techenij vyazkogo teploprovodnogo gaza v kanale // Vychislitel'nye tekhnologii. 2013. T. 18, № 4. P. 77–90.

© Вяткин А. В., Кучунова Е. В., 2019

**О ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛОЯ  
В НЕЛИНЕЙНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ**

В. М. Белоліпецкий, С. Н. Генова

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: sv@icm.krasn.ru

*Численное моделирование заглубления турбулентного слоя в стратифицированной жидкости под действием касательного напряжения. Для коэффициента вертикального обмена используется формула Прандтля-Обухова.*

*Ключевые слова: математическое моделирование, турбулентность, стратифицированная жидкость.*

**ON THE NUMERICAL MODEL OF THE PENETRATION OF A TURBULENT LAYER  
IN NONLINEARLY STRATIFIED FLUID**

V. M. Belolipetskii, S. N. Genova

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
E-mail: sv@icm.krasn.ru

*Numerical simulation of the depth of a turbulent layer in a stratified fluid under the action of shear stress. For the vertical exchange coefficient, the Prandtl-Obukhov formula is used.*

*Keywords: mathematical modeling, turbulence, stratified fluid.*

**Введение.** В большинстве случаев реальные геофизические среды являются стратифицированными. Если стратификация устойчивая, то она препятствует развитию турбулентности. Неустойчивая стратификация провоцирует развитие турбулентности. Примером течения, в котором определяющую роль играет вертикальный турбулентный обмен, является течение, возникающее при заглублении турбулизированного слоя жидкости в устойчиво стратифицированном водоеме под воздействием ветра. Его изучению посвящено много работ (см., например, списки литературы в [1; 3]). Для описания процесса заглубления перемешанного слоя в стратифицированной жидкости используются классическая  $e-\varepsilon$  – модель турбулентности и ее модификации. В настоящей работе для определения коэффициентов вертикального турбулентного обмена применяется формула Прандтля-Обухова [4; 5].

**Математическая модель.** Рассматривается течение в нелинейно стратифицированной среде под действием постоянного касательного напряжения. Стратификация обусловлена изменением солёности. При исследовании процесса заглубления турбулентного слоя делаются упрощения, в результате которых осредненное горизонтальное однородное движение описывается системой дифференциальных уравнений [1–2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ (v + K_{uz}) \frac{\partial U}{\partial z} \right] + f \cdot V, \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ (v + K_{uz}) \frac{\partial V}{\partial z} \right] - f \cdot U, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\chi_s + K_{sz}) \frac{\partial S}{\partial z} \right]. \quad (1)$$

Здесь  $U, V$  – горизонтальные составляющие осредненного вектора скорости течения;  $\rho$  – осредненная плотность;  $S$  – осредненная солёность воды;  $f$  – параметр Кориолиса;  $v, \chi_p$  – коэффициенты молекулярной вязкости и диффузии;  $t$  – время;  $z$  – вертикальная координата (направлена вниз);  $K_{uz}, K_{sz}$  – коэффициенты вертикального турбулентного обмена.

Стратификация обусловлена изменением солёности. Зависимость  $\rho$  от  $S$  задается соотношением

$$\rho(S) = \rho^* + \alpha(S - S^*), \quad (2)$$

где  $\rho, S^*$  – начальные значения плотности и солёности на водной поверхности.

Система (1), (2) замыкается формулой Прандтля-Обухова, в которой учитываются сдвиговый механизм перемешивания и устойчивая стратификация [4; 5]:

$$\begin{aligned} K_z &= \begin{cases} (0.05 \cdot h_1)^2 \sqrt{B} + k_{\min}, & B > 0, \\ k_{\min}, & B \leq 0, \end{cases} \\ B &= \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 - \frac{g}{\rho^*} \frac{\partial \rho}{\partial z}. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $h_1$  – глубина квазиоднородного (перемешанного) слоя, определяемая по первой от поверхности расчетной точки, в которой выполняется условие  $(0.05 \cdot z_k)^2 \sqrt{B|_{z=z_k}} < k_{\min}$ ,  $k_{\min}$  – минимальное значение турбулентной вязкости,  $K_{uz} = \alpha_u K_z$ ,  $K_{sz} = \alpha_s K_z$ ,  $\alpha_u, \alpha_s$  –

эмпирические коэффициенты, которые определяются численными экспериментами.

Толщина перемешанного слоя  $h(t)$  определялась следующим образом:

$$h^{n+1} = h_1 \text{ при } h_1 \geq h^n, \quad h^{n+1} = h^n \text{ при } h_1 < h^n.$$

Граничные условия для системы (1): на поверхности ( $z = 0$ )

$$\begin{aligned} (v + K_{uz}) \frac{\partial U}{\partial z} &= -\frac{\tau_{\text{вх}}}{\rho^*}, \\ (v + K_{uz}) \frac{\partial V}{\partial z} &= -\frac{\tau_{\text{вы}}}{\rho^*}, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$\tau_{\text{вх}}, \tau_{\text{вы}}$  – составляющие напряжения трения ветра;

на дне ( $z = H$ ):  $U = 0, V = 0, S = S_H$ . (5)

Начальные условия:

$$U(z) = 0, \quad V(z) = 0, \quad S^0(z) = S^* + \beta_1 z + \beta_2 z^2. \quad (6)$$

**Результаты численных экспериментов.** Численное решение начально-краевых задач (1)–(6) находилось по явной разностной схеме. Рассмотрена нелинейная стратификация в виде

$$\begin{aligned} S(z) &= S^* + \beta_1 z + \beta_2 z^2, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = \beta_1 z + 2\beta_2 z, \\ \rho(S) &= \rho^* + \alpha(S - S^*), \end{aligned} \quad (7)$$

здесь  $\beta_1 = (2-m) \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0$ ,  $\beta_2 = \frac{m-1}{H} \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0$ ,  $0 \leq m \leq 2$ .

Выполнены численные эксперименты по расчетам динамики заглупления перемешанного турбулентного слоя в устойчиво стратифицированном водоеме с использованием построенной математической модели.

Вариант  $m = 1$  ( $\beta_2 = 0$ ) соответствует линейной стратификации. Выполнены расчеты течений линейно стратифицированной жидкости в канале глубиной  $H = 30$  см, в соответствии с данными лабораторного эксперимента [3]. Для вертикального распределения плотности и значения касательного напряжения рассмотрен вариант II из [2]. Результаты расчетов  $\rho(z)$  по модели (1)–(6) хорошо согласуются с расчетами по моделям турбулентности второго порядка из [2]. Предлагаемый способ дает менее интенсивное в сравнении с экспериментом расширение турбулентного слоя при  $N_0 \cdot t < 360$ , а при  $N_0 \cdot t > 360$  расчеты по предложенной модели сближаются с экспериментом

$$N_0 = \left( \frac{g}{\rho^*} \frac{\partial \rho^0}{\partial z} \right)^{1/2} = 1.94 \text{ с}^{-1} - \text{частота Вьяйсяля-Брента.}$$

Рассмотрены варианты нелинейной стратификации (7):  $m = 0$  – градиенты плотности воды на поверхности больше, чем у дна;  $m = 2$  – градиенты плотности воды на поверхности меньше, чем у дна;  $m = 1$  – градиент плотности воды не изменяется по глубине. Для глубоких водоемов при учете сил Кориолиса заглупление турбулентного слоя не достигает дна, реализуется квазистационарный режим с  $h < H$ . Для вариантов нелинейной стратификации без учета сил Кориолиса ( $f = 0$ ) верхний слой для варианта  $m = 2$  перемешивается интенсивнее по сравнению

с вариантом  $m = 0$ . Придонный слой для варианта  $m = 2$  перемешивается медленнее по сравнению с вариантом  $m = 0$ .

Рассмотрен численный алгоритм для описания процессов вертикального турбулентного обмена в нелинейно стратифицированном водоеме под действием постоянного касательного напряжения, основанный на применении формулы Прандтля–Обухова для коэффициентов вертикального турбулентного обмена. Результаты расчетов вертикальных распределений плотности и динамики заглупления перемешанного слоя по предлагаемой модели согласуются с экспериментальными данными и с расчетами по  $\epsilon$ - $\epsilon$  – модели и ее модификациям.

### Библиографические ссылки

1. Зиновьев А. Т., Яковенко С. Н. Моделирование вертикального турбулентного обмена в пристенном стратифицированном течении // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 6. С. 57–64.
2. Васильев О. Ф., Овчинникова Т. Э., Черных Г. Г. Математическое моделирование заглупления турбулентного слоя в стратифицированной жидкости // Доклады Академии Наук. 2012. Т. 443, № 5. С. 578–582.
3. Kato H., Phillips O. M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid // J. Fluid Mech. 1969. Vol. 37, part 4. P. 643–655.
4. Обухов А. М. Турбулентность в температурно-неоднородной атмосфере // Труды Ин-та теорет. геофиз. АН СССР. 1946. № 24 (151). С. 3–42.
5. Математические модели циркуляции в океане : под ред. Г. И. Марчука и А. С. Саркисяна. Новосибирск : Наука, 1980. 288 с.

### References

1. Zinoviev A. T., Yakovenko S. N. Modelirovanie vertikal'nogo turbulentnogo obmena v pristennom stratificirovannom techenii [Modeling of vertical turbulent exchange in the near-wall stratified flow] // PMTF. 1998. Vol. 39, № 6. P. 57–64.
2. Vasil'ev O. F., Ovchinnikova T. E., Chernykh G. G. Matematicheskoe modelirovanie zaglubleniya turbulentnogo sloja v stratificirovannoj zhidkosti [Mathematical modeling of turbulent layer sinking in stratified fluid] // Reports of the Academy of Sciences. 2012. Vol. 443, № 5. P. 578–582.
3. Kato H., Phillips O. M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid // J. Fluid Mech. 1969. Vol. 37, part 4. P. 643–655.
4. Obukhov A. M. Turbulentnost' v temperaturno-neodnorodnoj atmosfere [Turbulence in a temperature-inhomogeneous atmosphere] // Proceedings of The Institute. Geophysics. USSR ACADEMY OF SCIENCES. 1946. № 24 (151). P. 3–42.
5. Matematicheskie modeli cirkuljacii v okeane [Mathematical models of circulation in the ocean] : Ed. G. I. Marchuk and A. S. Sarkisyan. Novosibirsk : Science, 1980. 288 p.

© Белолипецкий В. М., Генова С. Н., 2019

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭРМИТОВЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА\***

Л. В. Гилева, Е. Д. Карепова\*

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
\*E-mail: e.d.karepova@icm.krasn.ru

*Для решения трехмерного уравнения Пуассона предложен эффективный численный метод с использованием новых эрмитовых элементов класса  $C^0$ , допускающих применение коллокации. Это позволяет сократить размерность системы уравнений без нарушения порядка сходимости.*

*Ключевые слова: трехмерное уравнение Пуассона, метод конечных элементов, эрмитовы конечные элементы, метод коллокации.*

**THE APPLICATION OF SPECIAL HERMITE FINITE ELEMENTS TO THE 3D POISSON EQUATION**

L.V. Gileva, E. D. Karepova\*

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
\*E-mail: e.d.karepova@icm.krasn.ru

*For the 3D Poisson equation, a new efficient version of the finite element method is proposed. This method is based on the use of a  $C^0$  Hermite finite element of degree 3, which can be combined with the collocation technique. This results in reducing the dimension of the system of equations in comparison with the standard finite element scheme without deterioration of the convergence order. It is shown that the matrix of the reduced system is that of the finite element method but for elements with a smaller number of degrees of freedom. Numerical experiments confirm the theoretical estimates.*

*Keywords: 3D Poisson equation, finite element method, Hermite finite elements, collocation method.*

Эрмитовы конечные элементы класса  $C^0$  могут успешно применяться при численном решении краевых задач для уравнений в частных производных второго порядка, где не требуется существование непрерывных первых производных у слабого решения. Они значительно проще, чем эрмитовы элементы класса  $C^1$  [1; 2]. Наиболее простой версией эрмитовых элементов являются прямоугольные элементы класса  $C^0$ , базисные функции которых представляют собой тензорное произведение одномерных многочленов.

Преимущество эрмитовых элементов по сравнению с лагранжевыми элементами такой же степени состоит в том, что они позволяют существенно уменьшить размерность системы алгебраических уравнений при одинаковом порядке сходимости. Наиболее эффективно это свойство проявляется в трехмерном случае [3]. Помимо этого, для некоторых уравнений использование специальных эрмитовых элементов позволяет применить метод коллокации, в результате чего размерность системы уравнений становится еще меньше. В [4] рассматривается применение нового прямоугольного эрмитова элемента

третьей степени, предложенного авторами, в сочетании с методом коллокации для решения двумерного уравнения диффузии с постоянным коэффициентом. Особенность этого элемента состоит в том, что его степени свободы содержат значения вторых производных в узлах. В [5] этот подход обобщен для двумерного уравнения реакции-диффузии с переменным коэффициентом.

В настоящей работе рассматривается трехмерный аналог такого конечного элемента и его применение для решения уравнения Пуассона.

В трехмерном кубе  $\Omega$  с границей  $\Gamma$  рассмотрим задачу Дирихле для уравнения Пуассона:

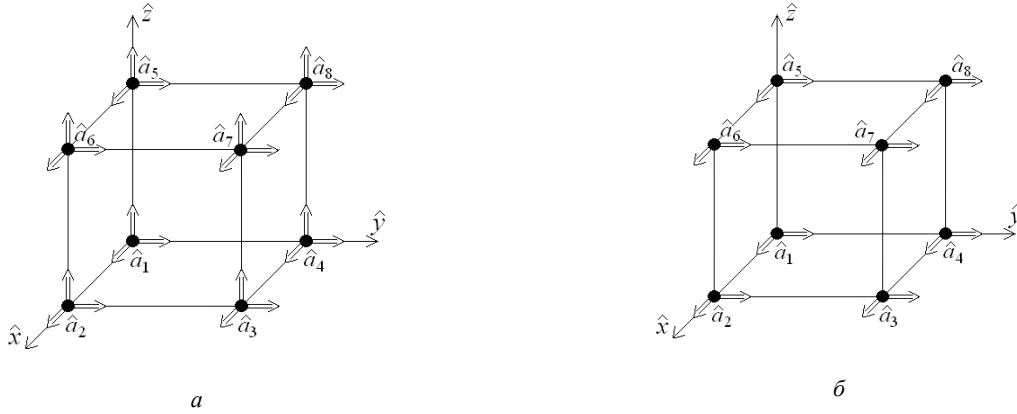
$$\Delta u = f(x, y, z) \text{ в } \Omega, \tag{1}$$

$$u = 0 \text{ на } \Gamma, \tag{2}$$

где  $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$  – оператор Лапласа;  $f \in H^2(\Omega)$ .

В области  $\Omega$  построим равномерную прямоугольную сетку с узлами  $(x_i, y_j, z_k)$ ,  $i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, m, k = 0, \dots, l$ .

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-47-242005: «Построение и обоснование новых эрмитовых конечных элементов для численного решения задач математической физики»).



«Эталонный» эрмитов элемент третьей степени (а) и вспомогательный эрмитов элемент (б). Двойные стрелки показывают степени свободы, являющиеся значениями вторых производных в узле по соответствующему направлению

Для построения схемы метода конечных элементов для задачи (1)–(2) мы используем эрмитов конечный элемент третьей степени, представленный на рисунке, а. Множество степеней свободы этого элемента состоит из значений функции и ее вторых производных по каждой переменной в узлах элемента.

В результате мы получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений приближенного решения  $u^h(x_i, y_j, z_k)$  и приближенных значений вторых производных  $u_{xx}^h(x_i, y_j, z_k)$ ,  $u_{yy}^h(x_i, y_j, z_k)$ ,  $u_{zz}^h(x_i, y_j, z_k)$   $i = 1, \dots, n-1$ ,  $j = 1, \dots, m-1$ ,  $k = 1, \dots, l-1$  во внутренних узлах сетки.

На основании (1) для приближенного решения мы можем записать соотношение

$$-u_{xx}^h(x_i, y_j, z_k) - u_{yy}^h(x_i, y_j, z_k) - u_{zz}^h(x_i, y_j, z_k) \approx f(x_i, y_j, z_k).$$

Оно позволяет исключить из системы уравнений неизвестные  $u_{xx}^h(x_i, y_j, z_k)$  либо  $u_{yy}^h(x_i, y_j, z_k)$  либо  $u_{zz}^h(x_i, y_j, z_k)$ . В результате вместо системы из  $4N_{\text{int}}$  уравнений мы получим систему из  $3N_{\text{int}}$  уравнений, где  $N_{\text{int}}$  – число внутренних узлов сетки.

Используя элементарные преобразования, мы можем привести матрицу редуцированной системы, полученной в результате исключения части неизвестных, к симметричному виду. Кроме того, можно показать, что она является матрицей системы уравнений метода конечных элементов для элемента с меньшим

числом степеней свободы, показанного на рисунке, б. Отсюда следует, что эта матрица невырождена и редуцированная система имеет единственное решение.

Доказано, что приближенное решение имеет четвертый порядок сходимости в среднеквадратичной норме, что характерно для конечных элементов третьей степени. Таким образом, уменьшение размерности системы уравнений не нарушает порядок сходимости, что подтверждено результатами численных экспериментов.

## References

1. Brenner S., Scott L. *The Mathematical Theory of Finite Element Method*. 1994, New York, Springer-Verlag, 420 p.
2. Zhang S. On the full  $C_1$ - $Q_k$  finite element spaces on rectangles and cuboids, *Adv. Appl. Math. Mech.*, 2010. Vol. 2, № 6. P. 701–721.
3. Shaidurov V., Shut S., Gileva L. Some properties of Hermite finite elements on rectangles. *AIP Conference Proceeding*, 2014. Vol. 1629. P. 32–43.
4. Gileva L., Karepova E., Shaidurov V. The application of a special Hermite finite element coupled with collocation to the diffusion equation. *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11386. P. 44–55.
5. Gileva L., Karepova E., Shaidurov V. A combination of a special Hermite finite element with collocation for a reaction-diffusion type equation. *Lobachevskii J. Math.*, 2019. Vol. 40, № 4. P. 471–480.

© Гилева Л. В., Кареева Е. Д., 2019

## МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ИСХОДНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

Н. В. Еремин

<sup>1</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 53

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: kaizoku813@gmail.com

*Разработана численная модель разрушения композиционного материала с учетом исходной поврежденности. Получены расчетные значения предела прочности композиционного материала в зависимости от поврежденности.*

*Ключевые слова: моделирование, поврежденность, разрушение, механические свойства, композиционный материал, сосуды давления.*

## MODEL EVALUATION OF STRENGTH OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON THE INITIAL DAMAGE

N. V. Eremin

<sup>1</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS  
53, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
50/44, Akademgorodok Str., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: kaizoku813@gmail.com

*A numerical model of fracture of composite material based on the initial damage. The calculated values of the tensile strength of composite material depending on damage.*

*Keywords: modeling, damage, fracture, mechanical properties, composite material, pressure vessels.*

**Введение.** Композиционные материалы (КМ) по сравнению с другими материалами имеют ряд преимуществ: высокая прочность, повышенная жесткость и малый удельный вес [1]. В связи с этим, композиционные материалы эффективно раскрывают свой потенциал применения в металлокомпозитных баках высокого давления [2] для космических аппаратов.

Однако в процессе изготовления и эксплуатации фактическая прочность КМ может значительно отличаться от проектной. Это связано с тем, что внутри конструкции возникают механизмы разрушения, которые приводят к разрывам волокон, разрушению матрицы, а также потери связи между волокном и матрицей. Всё это приводит к снижению характеристик механических свойств материала.

**Численная модель разрушения КМ с исходной поврежденностью.** В механике КМ особое внимание уделяют численному моделированию [3–5]. Разрабатываются численные модели, которые позволяют прогнозировать эффективные характеристики механических свойств, рассчитывать неоднородные поля напряжений и деформаций, а также моделировать разрушение композита как многостадийный процесс [2].

В связи с этим, была разработана численная модель разрушения КМ с исходной поврежденностью. Данная модель подразумевает разрыв волокна в случайной точке (путем снижения матрицы жесткости конечных элементов в волокне) на определенную длину, которая описывается случайным нормальным распределением. Модель учитывает два состояния конечного элемента – неповрежденное состояние и состояние с поврежденностью.

При численном моделировании рассматривалась 3D-конечно-элементная модель однонаправленного КМ на основе углеродных волокон T1000 и эпоксидного связующего ЭД-И. Процентное содержание углеродных волокон в матрице варьировалось от 40 до 70 %. Геометрия модели состояла из набора объемных цилиндров (волокна) заключенных в прямоугольный параллелепипед (матрица). Характеристики механических свойств структурных элементов представлены в таблице.

Анализ напряженно-деформированного состояния выполнялся при растяжении вдоль направления армирования углеродных волокон. Нагрузка прикладывалась путем постоянного перемещения.



## Характеристики механических свойств структурных элементов

Характеристика	Волокно	Матрица
Модуль упругости, ГПа	290	3
Предел прочности, ГПа	6,6	0,1
Коэффициент Пуассона	0,28	0,32

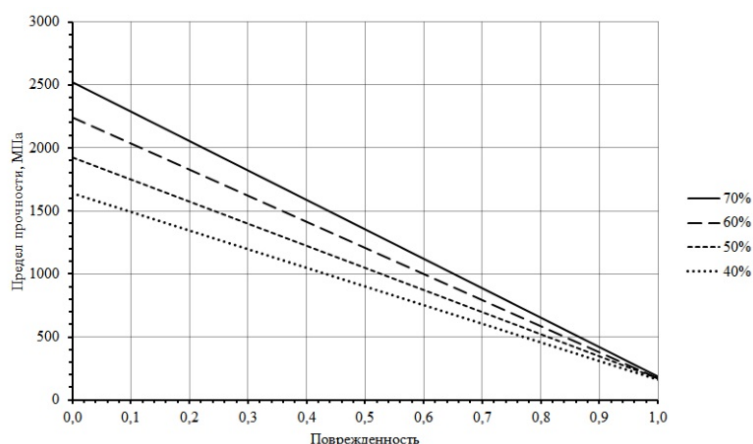


График зависимости предела прочности КМ от доли поврежденных волокон

**Результаты и их обсуждения.** В ходе исследования были выполнены численные расчеты при разном процентном содержании углеродных волокон. По результатам многовариантных расчётов были построены диаграммы деформирования при разном процентном содержании углеродных волокон и исходной поврежденности. В результате вычислительных экспериментов наблюдалась закономерность разрушения и деформирования композиционных материалов на микроуровне. После разрушения волокон напряжения перераспределяются на неповрежденные волокна и в материале возникает новое напряженно-деформированное состояние. Таким образом, если в материале накапливаются повреждения, которые включает в себя разрыв волокон и разрушение матрицы, то композиционный материал полностью теряет свою несущую способность.

С помощью аппроксимации полученных данных были построены графики зависимости предела прочности КМ (при разном процентном содержании углеродных волокон) от доли поврежденных волокон (см. рисунок). Из графика видно, что зависимость имеет линейный характер, при достижении полной поврежденности углеродных волокон предел прочности КМ приближен к пределу прочности матрицы.

Предложенный способ моделирования разрушения КМ с исходной поврежденностью позволяет прогнозировать предел прочности КМ этапе проектирования и эксплуатации, а также развивать обобщенные методики расчетов на прочность МКБВД.

#### Библиографические ссылки

1. Eremin N. V. Analysis of microstructure of laminated polymer composite material of metal composite overwrapped pressure vessel // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 19, № 2. P. 346–354.

2. Lepikhin A. M., Burov A. E., Moskvichev V. V. Possibilities of the design estimates of the reliability of a high-pressure metal-composite tank // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2015. Vol. 44, № 4. P. 344–349.

3. Silberschmidt V. *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*. Sawston: Woodhead Publishing, 2016. 616 p.

4. Буров А. Е., Кокшаров И. И., Москвичев В. В. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов. Новосибирск : Наука, 2003. 172 с.

5. De Luca A. and Caputo F. A Review On analytical Failure Criteria for Composite Materials // *AIMS Materials Science*. 2017. Vol. 4, № 5. P. 1165–1185.

#### References

1. Eremin N. V. Analysis of microstructure of laminated polymer composite material of metal composite overwrapped pressure vessel // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 19, № 2. P. 346–354.

2. Lepikhin A. M., Burov A. E., Moskvichev V. V. Possibilities of the design estimates of the reliability of a high-pressure metal-composite tank // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2015. Vol. 44, № 4. P. 344–349.

3. Silberschmidt V. *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*. Sawston: Woodhead Publishing, 2016. 616 p.

4. Burov A. E., Koksharov I. I., Moskvichev V. V. *Modelirovanie razrusheniya i treshchinostoykost voloknistykh metallokompozitov*. Novosibirsk : Nauka, 2003. 172 p.

5. De Luca A. and Caputo F. A Review On analytical Failure Criteria for Composite Materials // *AIMS Materials Science*. 2017. Vol. 4, № 5. P. 1165–1185.

УДК 532.5

**ЗАДАЧА О МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ КОНВЕКТИВНОГО ДВУХСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ  
С УЧЕТОМ ЭНЕРГИИ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА\***

М. В. Ефимова

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50/44  
E-mail: efmavi@icm.krasn.ru

*Интерес к изучению термокапиллярных течений вызван разработками новых технологий в области космического материаловедения. Построено стационарное течение системы бинарной смеси и вязкой жидкости с учетом влияния энергии межфазного теплообмена и проведен анализ уравнений малых возмущений основного течения.*

*Ключевые слова: устойчивость, уравнения Навье–Стокса, межфазный теплообмен.*

**THE PROBLEM OF THE SMALL DIFFERENCES OF THE CONVECTIVE TWO-LAYER FLOW  
WITH THE ACCOUNT OF THE ENERGY OF INTERPHASE HEAT TRANSFER**

M. V. Efimova

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
E-mail: efmavi@icm.krasn.ru

*Interest in the study of thermocapillary currents is caused by the development of new technologies in the field of space materials science. In the paper a stationary solution of the problem describing the flow of a two-layer system of a binary mixture and a viscous liquid with allowance for the influence of the energy of interphase heat transfer was constructed. The analysis of the equations of small perturbations of the main flow is carried out.*

*Keywords: Navier–Stokes equations, interphase heat transfer, thermal concentration forces.*

**Введение.** В последнее время наблюдается интерес к исследованиям процессов гидродинамической устойчивости, протекающих вблизи поверхностей раздела между несмешивающимися жидкостями. Такие задачи имеют огромное прикладное значение в исследованиях в областях химической промышленности, энергетике, в развитии космического материаловедения, при движении двухслойных потоков в каналах испарительно-конденсационных систем.

На возникновение межфазной неустойчивости двухслойных систем влияют различные параметры, такие как расход газа, температурный режим на границах области течения, толщина слоя жидкости, эффект Марангони, эффект Соре, энергия межфазного теплообмена (см. [1; 2]). Наличие этих факторов может существенно влиять на скорость протекания процессов теплообмена через поверхность раздела.

**Постановка задачи.** В условиях невесомости рассматривается совместное движение бинарной смеси и вязкой теплопроводной жидкости с общей поверхностью раздела. Система ограничена твердыми стенками с параболическим распределением температуры, на недеформируемой поверхности раздела поверхно-

стное натяжение линейно зависит от температуры и концентрации смеси. Кроме того, считается, что через твердую стенку и поверхность раздела отсутствует поток вещества.

Течение в системе описывается уравнениями Навье–Стокса, неразрывности, теплопроводности и массопереноса, записанные для каждого из слоев жидкости. На поверхности раздела учитывается условие энергообмена, а также выполнены кинематическое, динамическое условия, условия равенства скоростей и температур. Твердые стенки неподвижны и на них задано условие прилипания [3].

Поле скоростей в возникающей краевой задаче описывается в специальном виде, когда одна из компонент скорости линейно зависит от продольной координаты. Поля температур и концентрации имеют квадратичную зависимость от горизонтальной координаты. Основными характерными параметрами задачи являются число Марангони, число Прандтля, число Шмидта.

Впервые такого рода стационарные течения одной чисто вязкой жидкости изучались в работе Хименца [4].

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-01-00229).

Стационарное решение задачи без учета энергетического условия на поверхности раздела описывается в работе [5].

Для малых чисел Марангони (ползущее движение) получено аналитическое решение в каждом из слоев. Для исследования устойчивости основного течения выписаны уравнения малых возмущений. Рассматривались плоские нормальные возмущения. В результате выписана краевая задача, определяющая спектр декрементов возмущений. Анализ полученных результатов позволяет выявить условия, при которых частота колебаний имеет отличную от нуля мнимую часть. Именно в этом случае возмущения получают возможность экспоненциального роста или затухания амплитуды по времени.

#### Библиографические ссылки

1. Scriven L. E., Sterling C. V. The Marangoni effects // *Nature*. 1960. Vol. 187, № 4733. P. 186–188.
2. Stability of two-layer fluid flows with evaporation at the interface / V. B. Bekezhanova, I. A. Shefer, O. N. Goncharova, E. B. Rezanova // *Fluid Dynamics*. 2017. Vol. 52 (2). P. 189–200.
3. Андреев В. К., Захватаев В. Е., Рябицкий Е. А. Термокапиллярная неустойчивость. Новосибирск : Наука, 2000. 280 с.
4. Hiemenz K. Grenzschicht an einem in den gleichförmigen Flüssigkeitsstrom eingetauchten geraden Kreiszyylinder. *Dinglers Polytech. J.*, 1911. № 326, P. 321–410.
5. Efimova M. On one two-dimensional stationary flow of a binary mixture and viscous fluid in a plane layer // *Journal Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2016. № 9(1). P. 30–36.

#### References

1. Scriven L. E., Sterling C. V. The Marangoni effects // *Nature*. 1960. Vol. 187, № 4733. P. 186–188.
2. Stability of two-layer fluid flows with evaporation at the interface / V. B. Bekezhanova, I. A. Shefer, O. N. Goncharova, E. B. Rezanova // *Fluid Dynamics*. 2017. Vol. 52 (2). P. 189–200.
3. Andreev V. K., Zakhvataev V. E., Ryabitskiy E. A. Termokapillyarnaya neustoychivost' [Thermocapillary instability]. Novosibirsk : Nauka, 2000. 280 p.
4. Hiemenz K. Grenzschicht an einem in den gleichförmigen Flüssigkeitsstrom eingetauchten geraden Kreiszyylinder. *Dinglers Polytech. J.*, 1911. № 326, P. 321–410.
5. Efimova M. On one two-dimensional stationary flow of a binary mixture and viscous fluid in a plane layer // *Journal Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2016. № 9(1). P. 30–36.

© Ефимова М. В., 2019

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СИСТЕМЫ GRACE ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В. Б. Кашкин<sup>1</sup>, Т. В. Рублева<sup>1</sup>, А. Н. Мацулев<sup>2</sup>, К. В. Симонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: tvrubleva@mail.ru

*Исследование посвящено анализу особенностей изменения параметра EWH (Equivalent Water Height) над геоидом по спутниковым измерениям космической системы GRACE в сейсмоактивных районах сильнейших подводных землетрясений.*

*Ключевые слова: гравитационное поле, геоид, параметр EWH, подводные землетрясения, космическая система GRACE, обработка спутниковых данных.*

## INTERPRETATION OF GRACE SYSTEM DATA FOR SOLVING GEODYNAMIC MONITORING TASKS

V. B. Kashkin<sup>1</sup>, T. V. Rubleva<sup>1</sup>, A. N. Matsulev<sup>2</sup>, K. V. Simonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
E-mail: tvrubleva@mail.ru

*The study is devoted to the analysis of the features of the change in the EWH (Equivalent Water Height) parameter over the geoid from the satellite measurements of the GRACE space system in seismically active areas of the strongest underwater earthquakes.*

*Keywords: gravity field, geoid, EWH parameter, underwater earthquakes, GRACE space system, satellite data processing.*

В работе изучались особенности вариаций параметра эквивалентного уровня воды EWH (Equivalent Water Height) над контуром геоида по спутниковым измерениям космической системы GRACE в сейсмоактивных районах сильнейших землетрясений для выявления связи напряженно-деформированного состояния геосреды и процессов подготовки ожидаемого основного сейсмического события [1]. Орбитальные характеристики GRACE – полярная орбита, расстояние между парой спутников (порядка 200 км), период обращения около полутора часов.

Гравитационные аномалии Земли измеряются в сантиметрах эквивалентной высоты водяного столба (cm, EWH) [2]. Величина гравитационной аномалии определена через параметр расчетной модели – высоту эквивалентного водяного столба. Полученные измеренные параметры сравниваются со значениями гравитационного потенциала модели EIGEN-6C, привязанной к поверхности геоида. Применительно к океану это дополнительный тонкий слой воды в несколько сантиметров (примерно от –10 до +10 см). Это модельный параметр, который отображает особенности реальных геофизических процессов.

В обзорной работе [3] приводятся исследования геофизических процессов, вносящих существенный вклад в гравитационные аномалии, которые регистрируются аппаратурой спутников GRACE. Тектонические, сейсмические и вулканические процессы или движение магмы внутри Земли приводят к перераспределению масс. Тектонические процессы достаточно медленные (это годы, десятилетия и больше), а сейсмические и вулканические более быстрые, но их последствия регистрируются длительные периоды времени. Очевидно также, что и глобальные движения земной атмосферы могут вносить вклад в наблюдаемые гравитационные аномалии. Таким образом, природные процессы отражаются в гравитационных аномалиях.

Важно предложить характеристики, по которым можно разделить геофизические процессы на локальные и глобальные по степени влияния на гравитационное поле. Возможно, в решении этого вопроса помогут частотные распределения аномалий в виде гистограмм «помесячных» данных, а также полное частотное распределение гравитационных аномалий за период с 2003 по 2016 годы [4].

Отдельные «месячные» гистограммы отличаются большим разнообразием, что видно из рис. 1. Анализ отдельных гистограмм показал, что среднее частотное распределение гравитационных аномалий имеет экспоненциальный характер.

Как отмечено выше «эквивалентная высота водяного столба» (EWN) является характеристикой вычислительной модели, т. е. не является физической величиной в полном смысле. Однако опираясь на построенные гистограммы, можно определить такой параметр как информационная энтропия. Для этого

отождествим частотные распределения за весь период наблюдения с распределением вероятностей величины гравитационных аномалий. Это позволит предложить способ вычисления средней информационной энтропии отдельных месячных данных в глобальном масштабе и на локальном уровне, например, в очаговых зонах сильнейших землетрясений.

На рис. 2 представлены графики средней информационной энтропии в зависимости от размера очаговой области сильнейших землетрясений (магнитуды  $M > 8$ ) за период с 2003 по 2016 годы [5].

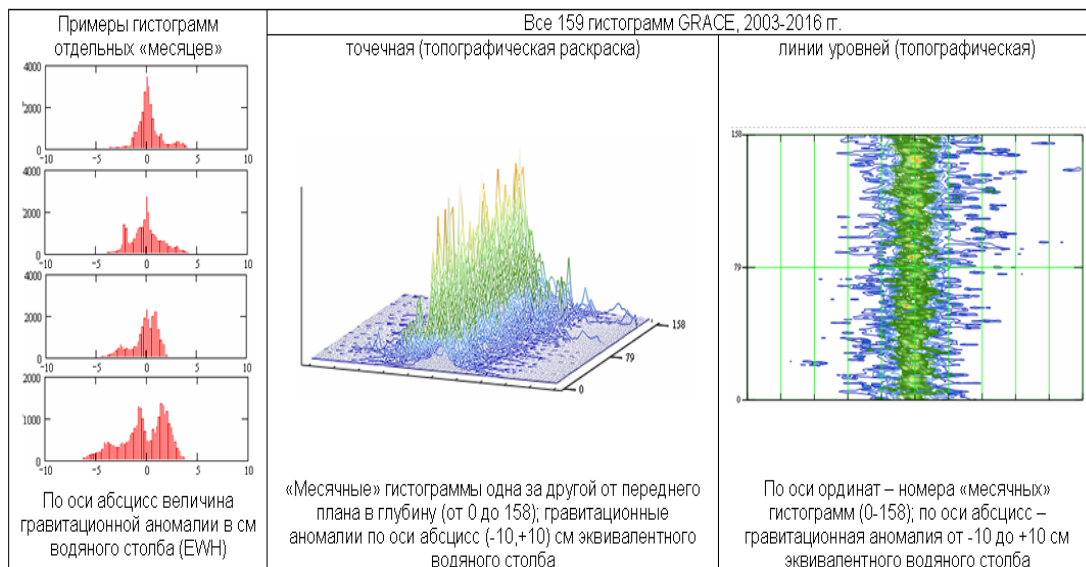


Рис. 1. Представлены гистограммы отдельных файлов данных GRACE (OCEAN) и их совокупность за период 2003–2016 гг.

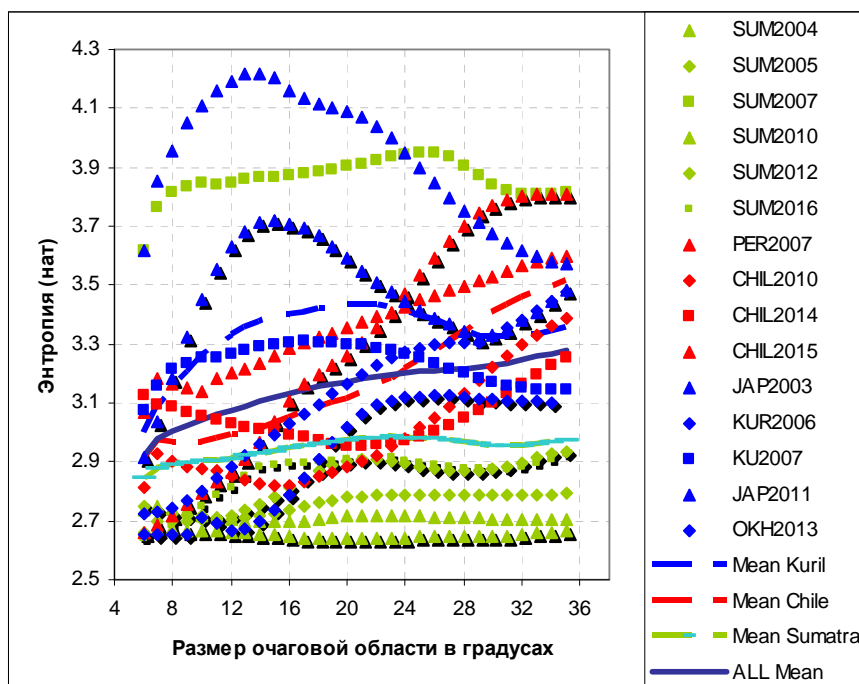


Рис. 2. Зависимость информационной энтропии от размера очаговой области в градусах (широты/ долготы) и от эпицентра сильнейших землетрясений ( $M > 8$ ) за 2003–2016 годы

Анализ полученных графиков показывает, что с увеличением размеров очаговой области значение энтропии возрастает, а вблизи эпицентра – данный параметр имеет минимальную величину. Таким образом, выполняется термодинамическое правило максимальной энтропии для системы в равновесии.

В нашей работе изучались средние значения энтропии для регионов Дальнего Востока (Курильские острова, Япония), Суматры (Индонезия) и Южной Америки (Перу, Чили), которые приведены на рис. 2. Можно видеть, что они имеют свои особенности для различных геофизических событий, например, для Суматры в 2004 и 2012 годах, а также для Чили в 2014 году. Эти исключения показывают, что корреляции между гравитационными аномалиями, наблюдаемыми космической системой GRACE, и сильными землетрясениями нет. Роль отдельных геофизических процессов, которые вносят вклад в гравитационные аномалии, еще предстоит выяснить.

Статистическая обработка глобальной изменчивости гравитационного поля Земли за 2003–2016 годы по данным GRACE показывает, что эта изменчивость имеет случайный характер с дифференциальным распределением вероятности близким к форме Коши (Лоренца). Это означает, что в спутниковых данных отсутствует значимая систематическая ошибка. Источники изменчивости гравитационного поля над океанами на масштабе 10-летия имеют термодинамический, основанный на случайности, характер. При исследовании доминирующих природных процессов не наблюдается устойчивого тренда. В нашем исследовании не выявлена корреляция между глобальной изменчивостью гравитационного поля и глобальной сейсмичностью Земли в масштабе 10-летнего периода наблюдений. Это означает, что сильнейшие землетрясения случаются в результате квазилокальных геодинамических процессов.

### References

1. Flechtner F., Sneeuw N., Schuh W.-D. (Eds.). Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions. *GEOTECHNOLOGIEN. Science Report*. 2014. № 20.
2. 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.
3. Wouters B., Bonin J.A., Chambers D.P., Riva R.E.M., Sasgen I. and Wahr J. GRACE, time-varying gravity, Earth system dynamics and climate change. *Review Article Rep. Prog. Phys.* 2014. Vol. 77. 41 p.
4. NASA [Electronic resource]. URL: [ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/ocean\\_mass/RL05/ascii/](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/ocean_mass/RL05/ascii/) (access: 02.06.2019).
5. USGS [Electronic resource]. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map> (access: 10.06.2019).

© Кашкин В. Б., Рублева Т. В.,  
Мацулев А. Н., Симонов К. В., 2019

## ПОЛУЛАГРАНЖЕВЫЙ МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ НЕРАЗРЫВНОСТИ

А. С. Кондратов

Сибирский федеральный университет  
 Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
 E-mail: kondratov247@mail.ru

*Представлен оригинальный численный алгоритм решения двумерного уравнения неразрывности, основанный на построении выпуклых оболочек вершин произвольного четырехугольника и использования формулы площади Гаусса.*

*Ключевые слова: уравнение неразрывности, полулагранжевые методы, OpenMP.*

## SEMI-LAGRANGE METHOD OF NUMERICAL SOLUTION OF THE CONTINUITY EQUATION

A. S. Kondratov

Siberian Federal University  
 79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
 E-mail: kondratov247@mail.ru

*This article presents an original numerical algorithm for solving the two-dimensional continuity equation, based on the construction of convex hulls of vertices of an arbitrary quadrangle and the use of the Gauss area formula.*

*Keywords: advection equation, semi-Lagrangian method, OpenMP.*

Уравнение неразрывности входит в состав многих математических моделей. Одним из важнейших направлений вычислительной аэродинамики является расчет обтекания тел. Математическая модель движения вязкого теплопроводного газа основана на системе уравнений Навье–Стокса, состоящей из уравнений движения, уравнения внутренней энергии и уравнения неразрывности. В данной работе рассматривается численное решение двумерного уравнения неразрывности. Одним из методов численного решения уравнения неразрывности является полулагранжевый метод. В нём поиск численного решения на каждом слое по времени раскладывается на три составляющие: аппроксимация интеграла на верхнем слое по времени, на котором решение еще не известно; построение характеристик (траекторий) с верхнего временного слоя на нижний слой; приближенное вычисление интеграла на нижнем слое по времени.

В работе рассмотрено две реализации алгоритмов численного решения двумерного уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} = 0, \quad x \in \Omega \subset \mathbb{R}^2, t \in [0, T],$$

здесь  $\rho(t, x, y)$  – неизвестная функция плотности,  $u(t, x, y)$ ,  $v(t, x, y)$  – компоненты вектора скорости. Будем считать, что  $u$ ,  $v$  достаточно гладкие известные функции. Функция плотности  $\rho(t, x, y)$  известна в начальный момент по времени и на границе втекания. Необходимо найти её значения внутри области

Полулагранжевый метод основан на балансовом интегральном соотношении [1–3] при переходе с одного временного слоя  $t_{k-1}$  на следующий слой  $t_k$ :

$$\int_{\Omega} \rho(t_k, x, y) d\Omega = \int_Q \rho(t_{k-1}, x, y) dQ + I(Q_{in}),$$

где  $\Omega$  – произвольный четырехугольник на  $k$ -м слое по времени,  $Q$  – четырехугольник с криволинейными сторонами на  $t_{k-1}$  слое по времени, вершины которого определяют характеристическими траекториями.

Границы четырехугольника  $Q$  на нижнем слое по времени определяются решением задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений

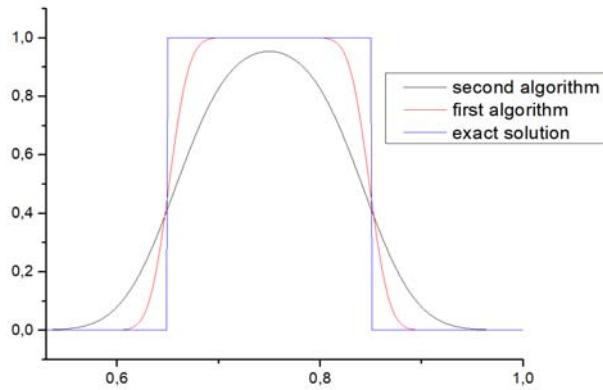
$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{x}}{dt} &= u(t, \tilde{x}, \tilde{y}), & \frac{d\tilde{y}}{dt} &= v(t, \tilde{x}, \tilde{y}), \\ \tilde{x}(t_k) &= V_x, & \tilde{y}(t_k) &= V_y, \end{aligned}$$

где  $V = (V_x, V_y)$  – вершины  $\Omega$ .

Для аппроксимации интегралов на верхнем и нижнем слое по времени применяется кусочно-постоянная интерполяция неизвестной функции. В настоящее время разработано множество различных методов для вычисления интеграла от кусочно-постоянной функции на  $(k-1)$ -м слое по времени, где решение считается известным.

В данной работе предлагается оригинальный алгоритм, основанный на построении простых многоугольников из вершин произвольного четырехугольника и использование формулы площади Гаусса. Достоинством этого метода вычисления интеграла на нижнем слое по времени является его универсальность и независимость от шага по времени. Формула для вычисления плотности на  $k$ -ом слое по времени получается следующей:

$$\rho_{i,j}^{h,k} = \frac{1}{\text{meas}(\Omega_{i,j})} \left( \int_{R_{i,j}^{k-1}} \rho^h(t_{k-1}, x, y) d\Omega + \int_{R_{in,i,j}^{k-1}} \rho_{in}^h u^h d\Omega \right).$$



Численное решение тестовой задачи

Дополнительно рассматривался метод расщепления двумерного уравнения неразрывности на две одномерных:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(2u\rho)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(2v\rho)}{\partial y} = 0.$$

Для построения численного алгоритма решения одномерных задач применяется аналогичные интегральные тождества [4; 5]:

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \rho(t_k, x, y_j) dx = \int_{Q_{x,i}^{k-1}} \rho(t_{k-1}, x, y_j) dx,$$

$$\int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} \rho(t_k, x_i, y) dy = \int_{Q_{y,j}^{k-1}} \rho(t_{k-1}, x_i, y) dy.$$

Здесь  $Q_{x,i}^{k-1}$  и  $Q_{y,j}^{k-1}$  – проекции окрестностей  $(x_{i-1/2}, x_{i+1/2})$  и  $(y_{j-1/2}, y_{j+1/2})$  соответственно. Использование кусочно-постоянной интерполяции неизвестной функции  $\rho$  на каждом слое по времени, позволяет получить явное выражение для вычисления неизвестной функции в узле:

$$\rho_{ij}^k = \frac{1}{2h} (I_{x,i}^{k-1} + I_{y,j}^{k-1} + I_{x,in}^{k-1}),$$

где  $I_{x,i}^{k-1}$ ,  $I_{y,i}^{k-1}$  – вычисленные значения одномерных интегралов по множествам  $Q_{x,i}^{k-1}$ ,  $Q_{y,i}^{k-1}$  на  $(k-1)$ -м слое по времени.

На рисунке представлены графики точного и вычисленных решений, полученных первым и вторым методом для тестовых расчетов. Несложно заметить, что первый метод значительно меньше сглаживает разрывные решения по сравнению со вторым методом.

Время расчетов по первому методу в 1,5–4 раза больше по сравнению с временем расчетов по второму методу. Также первый метод требует значительно больше оперативной памяти. Хотя второй метод больше сглаживает решение в окрестностях разрыва, его применение может быть оправдано в случае использования более мелкой сетки.

Проведенные вычислительные эксперименты подтверждают первый порядок сходимости для обеих модификаций вычислительного метода.

### Библиографические ссылки

1. Iske A. Conservative semi-Lagrangian advection on adaptive unstructured meshes // *Numer. Meth. Part. Diff. Eq.* 2004. Vol. 20. P. 388–411.
2. Вяткин А. В., Кучунова Е. В., Шайдуров В. В. Полулагранжевый метод решения двумерного уравнения неразрывности с дискретным законом сохранения // *Вычислительные технологии.* 2017. Т. 22, № 5. С. 27–38.
3. Xin Wen, Vyatkin A.V., Shaidurov V. Semi-Lagrangian Scheme for solving hyperbolic equation of first order // *Молодой учёный.* 2013. Т. 9, № 56. С. 6–13.
4. Vyatkin, A. V., Kuchunova E. V., Shaydurov V. V. Semi-Lagrangian difference approximations with different stability requirements // *RJNAMM.* 2018. Vol. 33, № 2. P. 123–135.
5. Кучунова Е. В., Керп А. С., Мальцева Е. С. Полулагранжевый метод для уравнения неразрывности и уравнения адвекции-диффузии // *Информационные технологии в науке.* 2018. Т. 5, № 9. С. 38–46.

### Referances

1. Iske A. Conservative semi-Lagrangian advection on adaptive unstructured meshes // *Numer. Meth. Part. Diff. Eq.* 2004. Vol. 20. P. 388–411.
2. Vyatkin A. V., Kuchunova E. V., Shaidurov V. V. [Semi-Lagrangian method for solving the two-dimensional continuity equation with a discrete conservation law] // *Vychislitel'nye tehnologii.* 2017. Vol. 22, № 5. P. 27–38 (In Russ)
3. Xin Wen, Vyatkin A. V., Shaidurov V. Semi-Lagrangian Scheme for solving hyperbolic equation of first order // *Molodoj uchjonyj.* 2013. Vol. 9, № 56. P. 6–13.
4. Vyatkin A. V., Kuchunova E. V., Shaydurov V. V. Semi-Lagrangian difference approximations with different stability requirements // *RJNAMM.* 2018. Vol. 33, № 2. P. 123–135.
5. Kuchunova E., Kerp A., Maltseva E. [A semi-Lagrangian algorithm for advection equation and advection-diffusion equation] // *Informacionnye tehnologii v nauke.* 2018. Vol. 5, № 9. P. 38–46 (In Russ)



УДК 004.942

## АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ И УСКОРЕНИЙ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

С. Г. Мартюшев

АО «Научно-производственный центр «Полус»  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в  
E-mail: Naabym@sibmail.com

*Проведено моделирование ударных воздействий, заданных в виде ударных спектров ускорений. Приведены результаты модального анализа конструкции прибора. Проанализировано изменение значений напряжений и ускорений в зависимости от модальной массы резонансных частот при ударных нагрузках.*

*Ключевые слова: моделирование, частотный анализ, ударный спектр ускорений, прочность, модальная масса.*

## ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF STRESSES AND ACCELERATIONS IN THE ONBOARD EQUIPMENT OF A SPACECRAFT ON RESONANT FREQUENCIES UNDER SHOCK LOADS

S. G. Martyushev

JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus"  
56v, Kirova Av., Tomsk, 634045, Russian Federation  
E-mail: Naabym@sibmail.com

*The simulation of shock actions specified in the form of shock acceleration spectra is carried out. The results of a modal analysis of the design of the device are presented. The change in the values of stresses and accelerations is analyzed, depending on the modal mass of the resonant frequencies under shock loads.*

*Keywords: modeling, frequency analysis, shock spectrum of accelerations, strength, modal mass.*

В последнее время ужесточаются требования к проведению испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на ударные воздействия. Уровни нагрузок задаются согласно техническому заданию в виде ударных спектров ускорений (УСУ), при этом стандартом допускается замена на одиночные удары. В связи с этим главной целью является исследование влияния резонансных частот и модальных масс на значения напряжений и ускорений при ударных воздействиях, заданных в виде ударных спектров ускорений [1; 2].

Исследование динамического отклика конструкции прибора невозможно без модального анализа [3–5]. Модальный анализ в диапазоне частот от 35 до 10 000 Гц проведен с определением модальных масс.

Моды со значением относительной модальной массы более 5 %, полученные в результате модального анализа конечно-элементной модели прибора в трех взаимно перпендикулярных направлениях, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты модального анализа

Номер моды	Резонансная частота, Гц	Коэффициент массового участия, %, по оси		
		<i>OX</i>	<i>OY</i>	<i>OZ</i>
1	181,87	0,0006	0,0003	3,33
9	307,84	0,0023	0,0321	8,43
17	435,41	0,0025	0,0013	4,31
20	456,01	0,0002	0,0191	14,4
28	529,21	17,4	0,1900	0,0646
30	544,10	33,5	0,0330	0,0001
31	553,76	7,82	0,0131	0,0045
767	5719,42	0,1980	2,14	0,0582
Общая эффективная масса*		93,33	93,08	94,2

\* Общая эффективная модальная масса при модальном анализе не достигает 100 %, так как часть конструкции жестко закреплена.

Таблица 2

Значения напряжений и ускорений при ударном воздействии по оси *OX*

Спектр ударного воздействия	Частотный диапазон расчета, Гц	Напряжение, МПа	Ускорение, g
УСУ, заданный по ТЗ	35–10 000	322,452	1804,355
	35–550	322,389	1704,002
	35–500	51,183	286,406

Таблица 3

Значения напряжений и ускорений при ударном воздействии по оси *OY*

Спектр ударного воздействия	Частотный диапазон расчета, Гц	Напряжение, МПа	Ускорение, g
УСУ, заданный по ТЗ	35–10 000	677,144	957,805
	35–407	677,125	945,778
	35–310	107,484	152,033

Таблица 4

Значения напряжений и ускорений при ударном воздействии по оси *OZ*

Спектр ударного воздействия	Частотный диапазон расчета, Гц	Напряжение, МПа	Ускорение, g
УСУ, заданный по ТЗ	35–10 000	356,387	2848,531
	35–310	356,341	2748,163
	35–180	56,57	452,152

По результатам расчета на ударное воздействие проведена оценка уровней напряжений и ускорений в элементах конструкции прибора (табл. 2–4). В целом в приборе максимальные напряжения при ударных воздействиях возникают на наиболее критичных по каждому из направлений резонансных частотах, характеризующихся большими коэффициентами массового участия. Все эти частоты находятся в низкочастотной области частотного диапазона, а все ускорения, действующие на прибор в более высокой части диапазона частот, не приводят к росту напряжений в элементах конструкции прибора.

Из табл. 2 видно, что максимальные значения напряжений и ускорений достигаются в диапазоне частот до 550 Гц вдоль оси *OX* и в более широком диапазоне существенно не меняются (для сравнения приведены результаты расчета в диапазонах до 500 Гц и до 10 000 Гц).

По результатам испытаний разработанная конечно-элементная модель прибора верифицирована. Выявленные при испытаниях значения резонансных частот отличаются от расчетных значений не более чем на 3,5 %.

Установлено, что максимальные значения ускорений и напряжений возникают на первых резонансных частотах прибора с наибольшей модальной массой.

## Библиографические ссылки

1. Мартюшев С. Г., Дементьев А. А. Различные подходы к моделированию ударных воздействий в

программном обеспечении Simulation // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (12–13 апр. 2018, г. Томск). Томск, 2018. С. 243–244.

2. Мартюшев С. Г., Дементьев А. А. Трехмерное моделирование внешних механических воздействий на приборы и устройства в SolidWorks Simulation // Вестник СибГУ. 2018. Т. 19, № 1. С. 82–97.

3. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.

4. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М. : ДМК Пресс, 2013. 784 с.

5. Панфилов С. М., Мартюшев С. Г. Моделирование систем амортизации изделий на базе амортизаторов типа АКСС с помощью программного комплекса SolidWorks 2009 // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XVIII науч.-техн. конф. / ОАО «НПЦ «Полюс» (22–23 апреля 2010, г. Томск). Томск : ООО «Печатная мануфактура», 2010. С. 303.

## References

1. Martyshev S. G., Dement'ev A. A. *Razlichnyye podkhody k modelirovaniyu udarnykh vozdeystviy v programmnoyem obespecheniye Simulation* [Different approaches to impact simulation in simulation software] // *Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva* : tez. dokl. nauch.-tekhn. konf. molodykh

spetsialistov (12–13 apr. 2018, Tomsk). Tomsk, 2018. P. 243–244.

2. Martynushev S. G., Dement'ev A. A. *Trokhmernoye modelirovaniye vneshnikh mekhanicheskikh vozdeystviy na pribory i ustroystva v SolidWorks Simulation* [Three-dimensional modelling of external mechanical effects on devices and machinery in SolidWorks simulation] // *VestnikSibGAU*. 2018. Vol. 19, № 1. P. 82–97.

3. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: problems, methods, recommendations]. Moscow, DMK Press, 2015, 562 p.

4. Rykov S. P. *Modelirovaniye konstruktсии v srede Femap with NX Nastran* [Structural modeling in Femap

with NX Nastran]. Moscow, DMK Press Publ., 2013, 784 p.

5. Panfilov S. M., Martynushev S. G. *Modelirovaniye sistemy amortizatsii izdeliy na baze amortizatorov tipa AKSS s pomoshch'yu programmnoy kompleksa SolidWorks 2009* [Modeling of depreciation system for products based on shock absorbers of the AKSS type using the SolidWorks 2009 software package] // *Elektronnyye I elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva: tezisy tez. dokl. XVIII nauch.-tekhn. konf. / OAO «NPTS «Polus»* (22–23 apr. 2010, Tomsk). Tomsk : OOO «Sorrowful manufactory», 2010. P. 303.

Мартюшев С. Г., 2019

**ПОСТРОЕНИЕ МНОГОСЕТОЧНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ ОБРАЗУЮЩИХ  
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: mtv241@mail.ru

*Предложена процедура построения многосеточных конечных элементов для расчета композитных и однородных цилиндрических оболочек (фюзеляжи самолетов, корпуса космических ракет) с применением образующих конечных элементов.*

*Ключевые слова: композиты, цилиндрические оболочки, многосеточные и образующие конечные элементы.*

**CONSTRUCTION OF MULTIGRID FINITE ELEMENTS TO CALCULATE SYLINDRICAL  
SHELLS BASED ON GENERATING FINITE ELEMENTS**

A. D. Matveev

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
E-mail: mtv241@mail.ru

*The procedure of construction of multigrid finite elements for the calculation of composite and homogeneous cylindrical shells (aircraft fuselage, rocket body, which are widely used in aircraft and rocket-space technology designs) with the use of generating elements is shown.*

*Keywords: composites, cylindrical shells, multigrid and generating finite elements.*

**Введение.** Метод конечных элементов (МКЭ) [1] активно используется в расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций. В данной работе предложена процедура построения трехмерных многосеточных конечных элементов (МнКЭ) сложной формы для расчета композитных и однородных цилиндрических оболочек с применением образующих конечных элементов (КЭ). Например, крылья и фюзеляжи самолетов, корпуса ракет, которые применяются в авиационной и ракетно-космической технике. Как известно [2; 3], при построении  $m$ -сеточного композитного конечного элемента ( $m$ сКЭ) используется  $m$  вложенных сеток. Мелкая сетка порождена базовым разбиением  $m$ сКЭ, которое учитывает его композитную структуру и сложную форму. На  $m-1$  крупных сетках определяются аппроксимирующие функции перемещений, применяемые для понижения размерности вектора узловых перемещений базового разбиения, что позволяет проектировать  $m$ сКЭ малой размерности. Аппроксимирующие функции перемещений и напряженное состояние в МнКЭ, описываемое уравнениями трехмерной задачи теории упругости [4], представляются в локальных декартовых системах координат. Суть предлагаемой процедуры состоит в том, что область МнКЭ получается путем параллельного перемещения в трехмерном пространстве плоского образующего КЭ в заданном направлении на заданное расстояние.

Перемещения в МнКЭ аппроксимируются степенными и лагранжевыми полиномами. Отметим, что если в расчетах тел на базе МКЭ применяются МнКЭ, то, в этом случае, по сути, реализуется метод многосеточных конечных элементов [2; 3]. Достоинства МнКЭ состоят в том, что они учитывают неоднородную структуру и сложную форму оболочек, порождают дискретные модели малой размерности и решения с малой погрешностью.

**1. Процедура построения многосеточных КЭ для расчета цилиндрических оболочек.** Процедуру построения МнКЭ рассмотрим в локальной декартовой системе координат  $Oxyz$  на примере двухсеточного КЭ ( $2$ сКЭ)  $V_d^a$  с характерными размерами  $17h \times 24h \times 18h$ , имеющего прямоугольное отверстие размерами  $2h \times 3h$ , сечение закрашено, рис. 1,  $h$  – задано.  $2$ сКЭ  $V_d^a$  армирован волокнами (сечением  $h \times h$ ), которые параллельны оси  $Oy$ . Считаем, что между разномодульными однородными телами, представляющие композитную структуру  $2$ сКЭ  $V_d^a$ , связи идеальны. Область  $2$ сКЭ  $V_d^a$  получается путем параллельного перемещения плоского образующего односеточного КЭ ( $1$ сКЭ)  $V_a$  сложной формы (рис. 2) вдоль оси  $Oy$  на расстояние  $d = 24h$ .

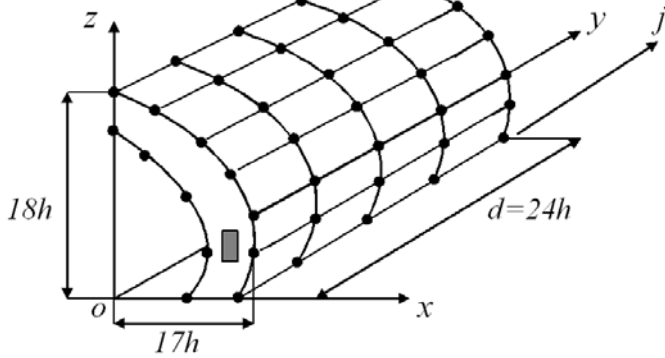


Рис. 1. Двухсеточный КЭ  $V_d^a$

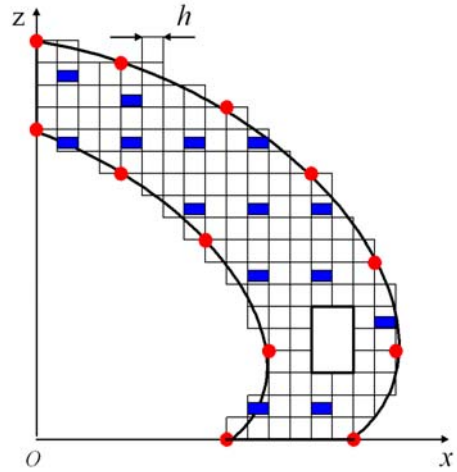


Рис. 2. Образующий 1сКЭ  $V_a$

Базовое разбиение  $R_d$  2сКЭ  $V_d^a$  состоит из однородных 1сКЭ  $V_e$  1-го порядка формы куба со стороной  $h$  [1],  $e=1, \dots, M$ , где  $M$  – общее число 1сКЭ  $V_e$ . Разбиение  $R_d$  учитывает (по микроподходу) неоднородную структуру, форму 2сКЭ  $V_d^a$  и порождает мелкую сетку  $h_d$ . Узлы 1сКЭ  $V_a$  (12 узлов, на рис. 2 отмечены точками) при его движении совпадают с узлами крупной сетки  $H_d$  2сКЭ  $V_d^a$ , узлы  $H_d$  отмечены точками, рис. 1, 60 узлов, т. е. с помощью узлов 1сКЭ  $V_a$  определяется сетка  $H_d$ , причем,  $H_d \subset h_d$ .

На рис. 2 показано сечение сетки  $h_d$ , сечения волокон закрашены. Деформирование области 1сКЭ  $V_e$  описывается уравнениями трехмерной задачи упругости [4], записанными в декартовой системе координат 1сКЭ  $V_e$ , т. е. в области 2сКЭ  $V_d^a$  реализуется трехмерное НДС. Паре чисел  $i, j$ , где  $i=1, \dots, 12$ ,  $j=1, \dots, 5$ , определим целое  $\beta$ , тогда  $\beta=1, \dots, 60$ . Базисную функцию  $\psi_\beta(x, y, z)$  для  $\beta$ -го узла крупной сетки  $H_d$  ищем в виде [5]

$$\psi_\beta(x, y, z) = N_i(x, z)L_j(y), \quad (1)$$

где  $\beta = \overline{1, 60}$ ,  $N_i(x, z)$  – функция формы  $i$ -го узла образующего 1сКЭ  $V_a$ ,  $i=1, \dots, 12$ , отвечающая полиному  $P(x, z)$ , который в системе координат  $Oxz$  (рис. 2) имеет вид [1]

$$P(x, z) = a_1 + a_2x + a_3z + a_4xz + a_5x^2 + a_6z^2 + a_7x^2z + a_8xz^2 + a_9xz^3 + a_{10}x^3z + a_{11}x^3 + a_{12}z^3, \quad (2)$$

$L_j(y)$  – полином Лагранжа 4-го порядка [1],

$$L_j(y) = \prod_{p=1, p \neq j}^5 \frac{y - y_p}{y_j - y_p} \quad j=1, \dots, 5, \quad y_p - \text{координата узла } p \text{ сетки } H_d, \text{ лежащего на оси } j, \text{ которая параллельна оси } Oy, \text{ рис. 1.}$$

В формуле (1) базисные функции  $\psi_\beta$  2сКЭ  $V_d^a$  представляются функциями формы  $N_i(x, z)$  образующего 1сКЭ  $V_a$  и в направлении движения образующего 1сКЭ (т. е. по оси  $Oy$ ) – полиномами Лагранжа  $L_j(y)$ . Используя (1), (2), аппроксимирующие функции перемещений  $u_d, v_d, w_d$ , построенные для крупной сетки  $H_d$ , представим в виде

$$u_d = \sum_{\beta=1}^{60} N_\beta u_\beta, \quad v_d = \sum_{\beta=1}^{60} N_\beta v_\beta, \quad w_d = \sum_{\beta=1}^{60} N_\beta w_\beta, \quad (3)$$

где  $N_\beta$  – базисная функция и  $u_\beta, v_\beta, w_\beta$  – перемещения  $\beta$ -го узла сетки  $H_d$ ,  $\beta = \overline{1, 60}$ .

Полную потенциальную энергию  $\Pi_d$  базового разбиения  $R_d$  запишем в форме

$$\Pi_d = \sum_{e=1}^M \left( \frac{1}{2} \delta_e^T [K_e] \delta_e - \delta_e^T \mathbf{P}_e \right), \quad (4)$$

где  $[K_e]$  – матрица жесткости,  $\mathbf{P}_e$ ,  $\delta_e$  – векторы узловых сил и перемещений 1сКЭ  $V_e$ , отвечающие локальной декартовой системе координат  $Oxyz$  2сКЭ  $V_d^a$  (рис. 1).

Используя (3), вектор узловых перемещений  $\delta_e$  базового 1сКЭ  $V_e$  выражаем через вектор узловых перемещений  $\delta_d$  (размерности  $n_d$ ) крупной сетки  $H_d$  ( $\delta_d = \{u_\beta, v_\beta, w_\beta\}^T$ ), т. е.

$$\delta_e = [A_e^d] \delta_d, \quad (5)$$

где  $[A_e^d]$  – прямоугольная матрица,  $e=1, \dots, M$ .

Подставляя (5) в (4), имеем  $\Pi_d = \Pi_d(\delta_d)$ . Из условия  $\partial \Pi_d(\delta_d) / \partial \delta_d = 0$ , получаем соотношение  $[K_d] \delta_d = \mathbf{F}_d$ , где  $[K_d]$  – матрица жесткости и  $\mathbf{F}_d$  – вектор узловых сил 2сКЭ  $V_d^a$ , которые вычисляются по формулам:

$$[K_d] = \sum_{e=1}^M [A_e^d]^T [K_e] [A_e^d],$$

$\mathbf{F}_d = \sum_{e=1}^M [A_e^d]^T \mathbf{P}_e$ . Отметим, что функции перемещений  $u_d, v_d, w_d$ , построенные на крупной сетке  $H_d$ , применяются только для понижения размерности  $n_R$  вектора узловых перемещений базового разбиения  $R_d$ , т. е. имеем  $n_d < n_R$ . Решение, построенное для крупной сетки  $H_d$ , с помощью формулы (5) проецируем на мелкую сетку  $h_d$ , что дает возможность вычислять напряжения в любом 1сКЭ  $V_e$  базового разбиения  $R_d$ . В силу (5) размерность вектора  $\delta_d$  (т. е. размерность 2сКЭ  $V_d^a$ ) не зависит от общего числа  $M$  базовых 1сКЭ  $V_e$ . Следовательно, можно использовать сколь угодно мелкие базовые разбиения  $R_d$ , которые позволяют сколь угодно точно учитывать неоднородную структуру 2сКЭ  $V_d^a$  и описывать трехмерное НДС в 2сКЭ  $V_d^a$ .

Трехсеточные КЭ (3сКЭ) проектируются на основе 2сКЭ, которые представляют область 3сКЭ, с помощью процедур п. 1. При построении  $n$ -сеточного КЭ используются  $n-1$  образующих КЭ, причем, узлы  $n-1$  образующего КЭ создают крупную сетку  $n$ -сеточного КЭ. Однородные МнКЭ проектируются по процедурам п. 1. Расчеты показывают, что анализ НДС однородных тел с применением МнКЭ требует в  $10^2 \div 10^5$  раз меньше объема памяти ЭВМ, чем реализация МКЭ для дискретных базовых моделей. При этом решения, отвечающие многосеточным и базовым дискретным моделям, отличаются друг от друга на малую величину.

**2. Пример расчета.** Проведен расчет цилиндрической композитной оболочки  $G$  сложной формы в декартовой системе координат  $Oxyz$  с характерными размерами  $17h \times 144h \times 18h$ ,  $h = 0,5$ , т. е. состоящей из шести композитных 2сКЭ  $V_d^a$  сложной формы,  $d = 1, \dots, 6$  (рис. 1). Оболочка при  $y = 0$  закреплена,  $E_b / E_0 = 10$ ,  $\nu = 0,3$ , где  $E_b$  ( $E_0$ ) – модуль Юнга волокна (матрицы),  $\nu$  – коэффициент Пуассона. На оболочку  $G$  действует равномерная нагрузка  $q_z = 0,045$ . Анализ результатов расчетов показывает, что максимальные перемещения (эквивалентные напряжения, определяемые по 4-й теории прочности)

базовой  $\mathbf{R}_0$  и двухсеточной  $\mathbf{R}_h$  дискретных моделей оболочки  $G$  отличаются на 1,24 % (на 0,11 %). Модель  $\mathbf{R}_h$  требует в 244,75 раза меньше памяти ЭВМ, чем базовая  $\mathbf{R}_0$ . В приведенном примере расчета 2сКЭ  $V_d^a$  обеспечивают малую погрешность решения и большую экономию объема памяти ЭВМ.

#### Библиографические ссылки

1. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир. 1981. С. 304.
2. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных пластин и балок // Вестник КрасГАУ. 2016. № 12. С. 93–100.
3. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах трехмерных однородных и композитных тел // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия: Физ.-матем. науки. 2016. Т. 158, кн. 4. С. 530–543.
4. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк. 1982. с. 264.
5. Матвеев А. Д. Метод образующих конечных элементов // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6. С. 141–154.

#### References

1. Norri D., de Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction to the finite element method]. Moscow, Mir, 1981. 304 p.
2. Matveev A. D. *Metod mnogosetochnykh konechnykh elementov v raschetakh kompozitnykh plastin i balok* [Multigrid method for finite elements in the analysis of composite plates and beams] // *Vestnik KrasGAU*. 2016. № 12. P. 93–100.
3. Matveev A. D. *Metod mnogosetochnykh konechnykh elementov v raschetakh trekhmernykh odnorodnykh i kompozitnykh tel* [The method of multigrid finite elements in the calculations of three-dimensional homogeneous and composite bodies] // *Uchen. zap. Kazan. un-ta. Seriya: Fiz.-matem. Nauki*. 2016. T. 158, kn. 4. P. 530–543.
4. Samul' V. I. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Vysshaya shkola. 1982. 264 p.
5. Matveev A. D. *Metod obrazuyushchikh konechnykh elementov* [Generating Finite Element Method] // *Vestnik KrasGAU*. 2018. № 6. P. 141–154.

© Матвеев А. Д., 2019

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КРИВОЛИНЕЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Ю. В. Немировский<sup>1</sup>, Н. А. Федорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН  
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: feodorova.natalia@mail.ru, nfeodorova@sfu-kras.ru

*Представлены методы решения обратных задач армированной среды для создания плоских авиационных конструкций, удовлетворяющих заданному уровню силовых воздействий.*

*Ключевые слова: обратная задача армированной среды, криволинейные траектории.*

## EXAMPLES OF SOLVING INVERSE PROBLEM FOR FIBER-LAMINATED STRUCTURES WITH CURVILINEAR REINFORCEMENT

Y. V. Nemirovsky<sup>1</sup>, N. A. Feodorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS  
4/1, Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: feodorova.natalia@mail.ru, nfeodorova@sfu-kras.ru

*We formulated and solved the inverse problem of determining the directions of rational reinforcement for various mechanical constraints. Nemirovsky's structural model for composite materials is used, based on the planar non-homogeneous thermoelasticity anisotropic theory. This report describes a new methodological approach to development of planar aeronautical constructions reinforced by curvilinear fibers sets.*

*Keywords: the inverse problem for a reinforced plate, curvilinear trajectories.*

**Введение.** Построение решения обратных задач выполнено на основе разработанного авторами методологического подхода моделирования армированных плоских конструкций [1–3]. Армированные конструкции являются элементами ответственного назначения в ракетно-космической технике [4–6]. За счет найденного в рамках обратной задачи способа армирования вдоль криволинейной траектории удовлетворяются заданные силовые воздействия на конструкцию. Описание напряженно-деформированного состояния плоской конструкции основано на одномерной структурной модели Ю. В. Немировского. Плоская конструкция представляет собой симметричный пакет из произвольных анизотропных слоев малой толщины. Рассмотрены кинематические задачи для пластины с эллиптическим отверстием, жестко закрепленным на внутреннем контуре пластины, и кинематической задачи с использованием дополнительных связей между характеристиками деформационного поля. Сформулированы разрешающие системы дифференциальных уравнений для нахождения подходящей структуры армирования, с целью удовлетворения заданной распределенной нагрузки на внешнем контуре конструкции.

**Постановка задачи.** Рассмотрены  $2n$ -слойные конструкции симметричной структуры из произвольных плоских анизотропных слоев  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ . Пред-

полагается, что температура постоянна, прослойки тонкие ( $\sum_i \delta_i \ll 1$ ), чтобы в конструкции реализовывалось плоское напряженное состояние. Рассмотрена плоская двухсвязная пластина с контурами  $\Gamma_1, \Gamma_2$ . Пусть один контур (например  $\Gamma_1$ ) жестко закреплен от смещений, а на втором ( $\Gamma_2$ ) действует распределенная нагрузка  $\bar{P}$ .

Плоская задача линейной неоднородной анизотропной задачи упругости в декартовой системе координат с учетом введенного армирования вдоль непрерывных криволинейных траекторий представляет собой следующие соотношения: уравнения равновесия относительно усилий  $N_{11}, N_{12}, N_{22}$ :

$$\frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

условие совместности деформаций в декартовой системе координат, модельное уравнение армирования, связывающее деформации  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$ , деформации в волокне  $\varepsilon_m^0$  и углы армирования  $\varphi_m$   $m$ -м семейством непрерывных волокон ( $m = 1, 2$ )

$$\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi_m + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi_m + \varepsilon_{12} \sin \varphi_m \cos \varphi_m = \varepsilon_m^0,$$

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00038).

В частности рассмотрели задачу с двумя слоями. Пусть  $2h$ -толщина пластины,  $\delta_1$  – толщина армирующего слоя первого направления  $\varphi_1$  с интенсивностью армирования  $\omega_1$ ,  $\delta_2$  – толщина армирующего слоя второго направления  $\varphi_2$  с интенсивностью армирования  $\omega_2$ . Тогда усилия запишем в виде

$$N_{11} = 2(h - \delta_1 - \delta_2)\sigma_{11}^c + 2\delta_1[(1 - \omega_1)\sigma_{11}^c + \omega_1\sigma_1^a] \cos^2 \varphi_1 + 2\delta_2[(1 - \omega_2)\sigma_{11}^c + \omega_2\sigma_2^a] \cos^2 \varphi_2,$$

$$N_{22} = 2(h - \delta_1 - \delta_2)\sigma_{22}^c + 2\delta_1[(1 - \omega_1)\sigma_{22}^c + \omega_1\sigma_1^a] \sin^2 \varphi_1 + 2\delta_2[(1 - \omega_2)\sigma_{22}^c + \omega_2\sigma_2^a] \sin^2 \varphi_2,$$

$$N_{12} = 2(h - \delta_1 - \delta_2)\sigma_{12}^c + 2\delta_1[(1 - \omega_1)\sigma_{12}^c + \omega_1\sigma_1^a] \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 + 2\delta_2[(1 - \omega_2)\sigma_{12}^c + \omega_2\sigma_2^a] \sin \varphi_2 \cos \varphi_2,$$

где  $\sigma_1^a, \sigma_2^a$  напряжения в волокнах арматуры первого и второго семейства соответственно. Их зависимость от температуры задается в виде

$$\sigma_1^a = E_1(\varepsilon_1 - \alpha_1^a T), \sigma_2^a = E_2(\varepsilon_2 - \alpha_2^a T),$$

где  $T$  – заданная постоянная температура;  $E_m$  – модуль Юнга материала  $m$ -го семейства волокон. Связь напряжений  $\sigma_{ij}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}$  для неоднородного армированного материала запишем в виде

$$\sigma_{ij} = (1 - \sum_{m=1}^2 \omega_m) \sigma_{ij}^c + \sum_{m=1}^2 \sigma_m \omega_m l_{mi} l_{mj}, \quad l_{m1} = \cos \varphi_m,$$

$l_{m2} = \sin \varphi_m$ , где напряжения в связующем  $\sigma_{ij}^c$  находим по формулам

$$\sigma_{ii}^c = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_{ii} + \nu \varepsilon_{jj} - \alpha^c (1 + \nu) T),$$

$$\sigma_{ij}^c = \frac{E}{(1 + \nu)} \varepsilon_{ij}, \quad j = 3 - i, i = 1, 2$$

где  $E, \nu, \alpha^c$  – соответственно, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного температурного расширения связующего материала.

В каждом слое введены условия постоянства сечений волокон, связывающие интенсивности армирования  $\omega_1, \omega_2$  и углы армирования  $\varphi_1, \varphi_2$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\omega_1 \cos \varphi_1) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_1 \sin \varphi_1) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x} (\omega_2 \cos \varphi_2) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_2 \sin \varphi_2) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

После решения кинематической задачи на внутреннем контуре из уравнений равновесия (1) получаем разрешающие уравнения относительно углов армирования и интенсивностей армирования. Систему замыкают два уравнения условий постоянства сечений волокон (2). Начальные условия для  $\omega_1, \omega_2$  и  $\varphi_1, \varphi_2$  вводятся на основе исходных данных технологического процесса по изготовлению конструкции.

Решение обратной задачи для армированной плоской конструкции позволяет за счет управления

структурой армирования создавать заданный уровень распределенной нагрузки на контуре.

### Библиографические ссылки

1. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов : монография. Красноярск : СФУ, 2010. 136 с.

2. Feodorova N. A., Nemirovsky Yu. V. Modeling limit states for curvilinearly reinforced rotated disks // *Mathematica Montisnigri*. 2019. Vol. XLIV. P. 84–99.

3. Feodorova N. A. Determination of Fiber-Structure for the Effective Reinforcement of Planar Composite-Material Constructions // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 338–343.

4. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Решение плоской задачи для металлокомпозиата, армированного одним семейством криволинейных волокон // *Вестник ЧГУУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2017. № 2 (32). С. 3–16.

5. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Предельное деформирование дисков газовых и гидротурбин при различных структурах армирования // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56, № 7/3. С. 191–196.

6. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Предельные деформации термоупругих плоских конструкций с криволинейным армированием // *Вестник СибГАУ*. 2016. № 1(17). С. 73–78.

### References

1. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. *Matematicheskoe modelirovanie ploskikh konstruksii iz armirovann'yx voloknist ykh materialov* [Mathematical modeling of flat structures made of reinforce fibrous materials]. Krasnoyarsk : Sib. Fed. Univ., 2010. 136 p. (In Russ.).

2. Feodorova N. A., Nemirovsky Yu. V. Modeling limit states for curvilinearly reinforced rotated disks // *Mathematica Montisnigri*. 2019. Vol. XLIV. P. 84–99.

3. Feodorova N. A. Determination of Fiber-Structure for the Effective Reinforcement of Planar Composite-Material Constructions // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 338–343.

4. Nemirovskij Ju. V., Feodorova N. A. [Solving a flat problem for a metal composite reinforced with one family of curved fibers] // *Vestnik ChGPU im. I. Ja. Jakovleva. Seriya: Mehanika predel'nogo sostojanija*. 2017. № 2 (32). P. 3–16 (In Russ.).

5. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. [Ultimate deformations of gas and hydraulic turbine disks with various reinforcement structures] // *Izvestia vuzov. Physics*. 2013. Vol. 56, № 7/3. P. 191–196 (In Russ.).

6. Nemirovskij Ju. V., Feodorova N. A. [Ultimate deformations of thermoelastic flat structures with curvilinear reinforcement]. *Vestnik SibGAU*. 2016. № 1(17). P. 73–78 (In Russ.).

© Немировский Ю. В., Федорова Н. А., 2019



## СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

С. А. Перетокин<sup>1</sup>, В. А. Миронов<sup>2</sup>, К. В. Симонов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН – СКТБ «Наука»  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 53

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

\*E-mail: simonovkv50@gmail.com

*Проведен обзор и сравнение отечественного и зарубежного программного обеспечения для выполнения вероятностного анализа сейсмической опасности на основе метода Монте-Карло площадок особо ответственных объектов.*

*Ключевые слова: ВАСО, программное обеспечения для ВАСО, землетрясение.*

## COMPARISON OF SOFTWARE FOR PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS BASED ON THE MONTE CARLO METHOD

S. A. Peretokin<sup>1</sup>, V. A. Mironov<sup>2</sup>, K. V. Simonov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS – SDTB “Nauka”  
53, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

\*E-mail: simonovkv50@gmail.com

*The paper presents a review and comparison of domestic and foreign software to perform probabilistic seismic hazard analysis based on the Monte Carlo method of sites of critical objects.*

*Keywords: PSHA, software for PSHA, earthquake.*

Оценка сейсмической опасности площадки строительства – это неотъемлемая часть комплекса инженерно-геологических изысканий при проектировании ответственных объектов. В соответствии с пунктом 4.3 СП 14.13330.2018, для уточнения сейсмичности района строительства объектов повышенного уровня ответственности, необходимо проводить детальное сейсмическое районирование (ДСР). ДСР включает в себя комплекс исследований, которые можно объединить в две группы: составление и параметризация моделей возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) и подготовка уравнений прогнозирования движений грунта (УПДГ). Расчет сейсмических воздействий на основе этих групп данных выполняется в процедурах вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО). Выбор инструмента для проведения ВАСО – программного обеспечения, понимание его возможностей и ограничений, является актуальной задачей для получения корректных оценок сейсмической опасности.

Как вычислительная процедура, ВАСО впервые был представлен Корнеллом в 1968 году и трактуется в современной литературе как классический. Согласно данному подходу, вклады опасности интегрируются по всем магнитудам и расстояниям, для всех зон ВОЗ, согласно теореме полной вероятности. Явный недостаток такого подхода – отсутствие прозрачности

в процессе расчета для пользователя, из-за которого невозможно выявить относительный вклад в сейсмическую опасность от различных источников и их параметров.

В качестве альтернативы была разработана процедура ВАСО на основе метода Монте-Карло, использующая многочисленные случайные симуляции сейсмического процесса для расчета сейсмической опасности. Основы процедуры заложены в работах Шапиры в 1983 году. Однако из-за потребности в высоких вычислительных мощностях, пригодное для проведения полноценных расчетов ПО было реализовано более только через десять лет.

В конце девяностых годов были разработаны две процедуры ВАСО на основе метода Монте-Карло с использованием основ, заложенных Шапирой. Первая процедура была разработана учеными Эбель и Кафка, вторая – Муссоном.

Принципиальное отличие данных процедур состояла в способе задания модели зон ВОЗ и присвоения ей параметров сейсмического режима. В дальнейшем в мировой практике предпочтение отдавалось процедуре, разработанной Муссоном. В XXI веке использование процедуры Монте-Карло для выполнения ВАСО осуществлялось специалистами в разных странах, для чего были реализованы следующие программные комплексы.

Основные характеристики рассматриваемых программных комплексов

Характеристики, методы		Программное обеспечение					
		EQRМ	MoCaHAZ	МЗС	EqHaz	OQ Engine	EAST-2016
Тип сейсмического источника							
Площадной		да	да	да	да	да	да
Разлом	Линейный (2D)	огр.	нет	да	да	да	да
	Объемный (3D)		нет	да	да	да	да
Точечный		нет	да	нет	нет	да	да
Возможность задавать распредел. глубины по каждому источнику		да	да	да	да	да	да
Возможность задавать механизм очага по каждому источнику		да	нет	да	нет	да	да
Моделирование длины и ширины разрыва		да	нет	да	да	да	да
Распределение повторяемости магнитуд (сейсмический режим)							
Распределение Гутенберга–Рихтера		да	да	да	да	да	да
Распределение Гаусса		нет	нет	да	да	да	да
Настраиваемое интервальное распределение		да	нет	да	да	да	да
Уравнения прогнозирования движения грунта (УПДГ)							
Встроенные		да	да	да	да	да	да
Заданные пользователем		нет	да	да	да	да	да
Различные УПДГ для типов источников		да	нет	да	нет	да	да
Возможность задавать параметры УПДГ для грунтовых условий		да	да	да	нет	да	да
Логическое дерево							
Возможность установки логического дерева		да	нет	да	да	да	нет
Выходные данные							
Кривые опасности		да	да	да	да	да	да
Карты опасности с заданной вероятностью превышения		да	да	да	да	да	да
Однородные спектры опасности		нет	да	да	да	да	да

EQRМ – программное обеспечение (ПО) для оценки опасности и риска землетрясений, разработанное в правительственном учреждении Австралии, реализованное на языке программирования Python. EQRМ использовался для моделирования риска и опасности от землетрясений для территории Австралии [1]. Швейцарская ПО MoCaHAZ – калькулятор сейсмической опасности на основе Монте-Карло, внедренный в MATLAB. MoCaHAZ использовался для построения карт сейсмической опасности в Швейцарии в 2004 году [1].

Программа МЗС была разработана Муссоном и реализована на языке программирования Fortran. Данное ПО использовалось для анализа сейсмической опасности на Балканах и в Соединенном Королевстве [2]. EqHaz – программный комплекс с открытым исходным кодом на языке программирования Fortran. EqHaz был разработан в 2010–2011 годах учеными Ассатуриансом и Аткинсон, как альтернатива программам, основанным на классическом подходе, для проведения ВАСО в регионах со стабильным континентальным режимом, с низкой и умеренной сейсмичностью [3]. Расчетный модуль OpenQuake Engine реализован на языке программирования Python [4].

Для создания отечественного комплекта карт ОСР-97 был использован пакет программ PRB-60, разработанный в 1994–1995 гг. Методические основы пакета и базовые алгоритмы были разработаны

А. А. Гусевым с участием Л. С. Шумиловой и В. М. Павлова. Актуализация PRB-60 выполнялась в 2003, 2010, 2016 гг. Последняя модификация этого ПО получила наименование EAST-2016 [5]. Все упомянутые программы и их функциональные возможности представлены в таблице.

По таблице видно, что по функциональным возможностям отечественное программное обеспечение не уступает зарубежным. При этом программный комплекс EAST-2016 ориентирован на отечественные нормативные документы (ГОСТ Р 57546–2017, СП 14.13330.2018), что делает его использование предпочтительнее при выполнении ВАСО для площадок строительства объектов повышенного уровня ответственности.

**Библиографические ссылки**

1. SHARE – European project for probabilistic seismic hazard assessment [Электронный ресурс]. URL: <http://www.share-eu.org/> (дата обращения: 04.09.2019).
2. Mosca I., Sargeant S., Musson, R. M. W. Benchmarking recent PSHA approaches // SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World (9-10 July 2015); Cambridge UK.
3. Engineering Seismology Toolbox [Электронный ресурс]. URL: <https://www.seismotoolbox.ca/> (дата обращения: 04.09.2019).

4. OpenQuake Engine [Электронный ресурс]. URL: <https://storage.globalquakemodel.org/openquake> (дата обращения: 04.09.2019).

5. Общее сейсмическое районирование – от карт ОСР-97 к картам ОСР-2016 и картам нового поколения в параметрах физических характеристик / А. Д. Завьялов, С. А. Перетокин, Т. И. Данилова и др. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. № 4 (45). С. 47–68.

#### References

1. SHARE – European project for probabilistic seismic hazard assessment [Electronic resource]. URL: <http://www.share-eu.org/> (access: 04.09.2019).

2. Mosca I., Sargeant S., Musson, R. M. W. Benchmarking recent PSHA approaches // SECED 2015 Con-

ference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World (9-10 July 2015); Cambridge UK.

3. Engineering Seismology Toolbox [Electronic resource]. URL: <https://www.seismotoolbox.ca/> (access: 04.09.2019).

4. OpenQuake Engine [Electronic resource]. URL: <https://storage.globalquakemodel.org/openquake> (access: 04.09.2019).

5. General seismic zoning: from maps GSZ-97 to maps GSZ-2016 and maps of new generation in the parameters of physical characteristics / A. D. Zavyalov, S. A. Peretokin, T. I. Danilova et al. // *Voprosy Inzhenernoi Seismologii*. 2018. № 4. P. 47–68 (In Russ.).

© Перетокин С. А., Миронов В. А.,  
Симонов К. В., 2019

**ОБ УТОЧНЕННОМ УРАВНЕНИИ ИЗГИБА ТОНКОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ**

И. Е. Петраков

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 E-mail: petrigr@gmail.com

*Композитные материалы широко применяются в различных отраслях, в том числе в ракетно-космической. Композиты имеют сложную структуру, что требует уточнения уравнений описывающих их деформированное состояние.*

*Ключевые слова: волокнистый композит, изгибное состояние, эффект Тимошенко, эффект Коссера.*

**ON THE REFINED EQUATION OF BENDING A THIN ELASTIC ROD**

I. E. Petrakov

Institute of Computational Modeling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
 E-mail: petrigr@gmail.com

*Many industries use composite materials in their production, including aircraft and space industry. Composites have a complex structure and can exhibit various effects such as longitudinal and transverse deformation and the cosserat effect. To describe the deformed state of the composite rod, we compiled refined equations taking into account the effects referred above.*

*Keywords: fiber reinforced composite, bending state, axial deformation, Timoshenko effect, Cosserat effect.*

Композитные материалы широко используются в различных областях промышленности, таких как машиностроение, авиастроение и в космической отрасли промышленности [1]. Проектирование и создание композитных материалов с заранее заданными свойствами для современных инженерных приложений напрямую связано с развитием соответствующих математических моделей [2; 3] и методов их исследования [4]. Поскольку композитные материалы обладают сложной неоднородной структурой, то для их описания требуются уравнения, учитывающие поперечную и продольную деформацию, и эффект Коссера.

Для описания плоского изгиба тонкого гибкого стержня использовалось классическое уравнение эластичности Эйлера. Для его получения был использован вариационный принцип Лагранжа, согласно которому в состоянии равновесия стержня достигается минимум интеграла энергии

$$J(x, y, \theta) = \int_0^l \left( \frac{1}{2} D(s) |\theta'|^2 - \mu g y \right) ds - F_x x(l) - F_y y(l) - M\theta(l),$$

где  $l$  – длина стержня;  $\mu$  – погонная масса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_x$  и  $F_y$  – проекции вектора изгибающей силы, приложенной к правому концу;  $M$  – изгибающий момент;  $D$  – изгибная жесткость. С граничными условиями  $\theta(0) = x(0) = y(0) = 0$ . Угол наклона оси стержня  $\theta(s)$  и координаты  $x(s)$  и  $y(s)$  связаны следующими соотношениями:

$$x' = \cos \theta, \quad y' = \sin \theta.$$

Эта задача минимизации эквивалента задаче минимизации лагранжиана

$$L(x, y, \theta) = J(x, y, \theta) - \int_0^l \lambda_x (x' - \cos \theta) ds - \int_0^l \lambda_y (y' - \sin \theta) ds,$$

где  $\lambda_x(s)$  и  $\lambda_y(s)$  – множители Лагранжа. Варьируя полученный функционал, получим уравнения и граничные условия, из которых следует, что угол наклона стержня является решением следующей краевой задачи:

$$(D(s)\theta')' = F \sin(\theta - \alpha) + \mu g (s - l) \cos \theta, \\ \theta(0) = 0, \quad D(l)\theta'(l) = M.$$

Для учета продольной деформации упругой линии и влияния поперечных сдвигов положение точки деформированного стержня можно представить в виде линейного разложения по толщине:

$$X(s, t) = x(s) + t\psi_x(s), \quad Y(s, t) = y(s) + t\psi_y(s),$$

где  $s, t$  – лагранжевы координаты точки относительно декартовой системы координат, связанной с центральной осью стержня. Согласно теореме о полярном разложении Кэли тензор дисторсии на оси представляется в виде произведения тензора, описывающего поворот окрестности точки на оси, и симметричного тензора – меры деформации Коши:

$$\begin{pmatrix} x' & \psi_x \\ y' & \psi_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon & \gamma \\ \gamma & 1 - \nu \varepsilon \end{pmatrix},$$

где  $\varepsilon$  – продольная деформация;  $\gamma$  – деформация сдвига;  $-\nu\varepsilon$  – деформация обжатия, поскольку предполагается, что на боковой поверхности отсутствуют внешние усилия. Полярное разложение позволяет составить интеграл энергии с учетом осевой деформации и поперечного сдвига. В результате решения задачи минимизации были получены краевая задача для уравнения упругой линии:

$$(D(s)\theta')' = F \sin(\theta - \alpha) - aF \sin 2(\theta - \alpha) + \mu g(s-l) \cos \theta, \\ \theta(0) = 0, \quad D(l)\theta'(l) = M$$

и уравнения для деформаций:

$$A\varepsilon = F \cos(\theta - \alpha), \quad B\gamma = -F \sin(\theta - \alpha),$$

$$A = (1 + 2\nu^2)ES, \quad B = GS,$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $G$  – модуль сдвига,  $S$  – площадь поперечного сечения стержня, и безразмерный параметр  $a$ :

$$a = \frac{F}{2} \left( \frac{1}{B} - \frac{1}{A} \right).$$

В теории упругости Коссера учитываются независимые вращения частиц микроструктуры материала относительно деформируемой среды. В физически линейном приближении момент сил сопротивления вращению частицы пропорционален углу относительного поворота  $\varphi$ . Тензор поворота равен суперпозиции относительного и переносного поворотов. С помощью полярного разложения тензора дисторсии и разложения тензора, характеризующего деформацию элементов среды и относительные повороты частиц [5], был получен интеграл упругой энергии

$$J(x, y, \theta) = \frac{1}{2} \int_0^l (A\varepsilon^2 + B\gamma^2 + C\varphi^2 + D|\theta'|^2 - 2\mu g y) ds - \\ - F_x x(l) - F_y y(l) - M\theta(l),$$

где  $C = KS$ ,  $K$  – модуль упругости Коссера. Минимизировав данный функционал были получены уравнения для осевой деформации, сдвига и угла относительного поворота:

$$A\varepsilon = F \cos(\theta - \varphi - \alpha), \quad B\gamma = -F \sin(\theta - \varphi - \alpha),$$

$$C\varphi = F \sin(\theta - \varphi - \alpha) - aF \sin 2(\theta - \varphi - \alpha).$$

Уточненное уравнение упругой линии принимает вид

$$(D\theta')' = C\varphi + \mu g(s-l) \cos \theta.$$

### Библиографические ссылки

1. Вильдeman В. Э., Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / под ред. Ю. В. Соколкина. М.: Наука; Физматлит, 1997. 288 с.
2. Christensen R. M. Mechanics of Composite Materials. New York: Dover Publ., 2005. 384 p.
3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
4. Кравчук А. С., Майборода В. П., Уржумцев Ю. С. Механика полимерных и композитных материалов: Экспериментальные и численные методы. М.: Наука, 1985. 304 с.
5. Садовский В. М. Термодинамически согласованные уравнения моментной теории упругости // Дальневосточный математический журнал. 2016. Т. 16, № 2. С. 209–222.

### References

1. Vil'deman V. E., Sokolkin Yu. V., Tashkinov A. A. *Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [The mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]. Moscow, Nauka Publ., 1997, 288 p.
2. Christensen R. M. Mechanics of Composite Materials. New York: Dover Publ., 2005. 384 p.
3. Rabotnov Yu. N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of a deformable solid]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 712 p.
4. Kravchuk A. S., Mayboroda V. P., Urzhumtsev Yu. S. *Mekhanika polimernykh i kompozitnykh materialov: Eksperimental'nye i chislennye metody* [Mechanics of Polymer and Composite Materials: Experimental and Numerical Methods]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 304 p.
5. Sadovskii V. M. [Thermodynamically consistent equations of the moment theory of elasticity] // *Dal'nevostochnyy matematicheskiy zhurnal*. 2016. T. 16, № 2. P. 209–222 (in Russ.)

© Петраков И. Е., 2019

**К РАСЧЕТУ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ПЛОСКИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ МЕТОДОМ РИТЦА**

Р. А. Сабиров

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

*Рассмотрено деформирование плоского изгибаемого стержня. Уравнения равновесия составлены с позиции механики тонких стержней; геометрические соотношения приняты на основе упрощения уравнений общей теории оболочек Власова. Для решения задач получено вариационное уравнение; реализация краевой задачи выполнена методом Ритца.*

*Ключевые слова: криволинейный изгибаемый стержень, напряжения, деформации.*

**TO CALCULATING A DEFORMED STATE OF A BENDED FLAT CURVED ROD BY THE RITZ METHOD**

R. A. Sabirov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: rashidsab@mail.ru

*The deformation of a flat bent rod is considered. The equilibrium equations are made from the position of the mechanics of thin rods; geometric relations are accepted on the basis of simplification of the equations of the general theory of Vlasov shells. To solve the problems, a variational equation is obtained; realization of the boundary value problem is performed by the Ritz method.*

*Keywords: curved bending rod, stresses, deformations.*

Согласно [1; 2] составим уравнения равновесия криволинейного элемента балки (рис. 1):

$$\begin{aligned} dQ_\alpha - N d\alpha + q_\gamma A d\alpha &= 0, \\ dN_\alpha + Q_\alpha d\alpha + q_\alpha A d\alpha &= 0, \\ Q_\alpha &= \frac{1}{A} \frac{dM\alpha}{d\alpha}. \end{aligned} \quad (1)$$

Геометрические уравнения получим как в [3], применив гипотезу Кирхгофа:

$$e_{\alpha\alpha} = \varepsilon_\alpha + K_\alpha \gamma + \Lambda_\alpha \gamma^2 + \dots \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= k_\alpha w + \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial \alpha}, \\ K_\alpha &= \frac{1}{A} \frac{\partial k_\alpha}{\partial \alpha} u + \frac{1}{A^3} \frac{\partial A}{\partial \alpha} \frac{\partial w}{\partial \alpha} - \frac{1}{A^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} - k_\alpha^2 w, \\ \Lambda_\alpha &= -k_\alpha K_\alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

Компоненты  $u(\alpha)$  и  $w(\alpha)$  – перемещения срединной плоскости, соответственно, по направлениям координат  $\alpha$  и  $\gamma$ .

Напряжения  $\sigma_{\alpha\alpha}$  и деформации  $e_{\alpha\alpha}$  свяжем законом Гука [4]:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{E}{1-\mu^2} e_{\alpha\alpha}. \quad (4)$$

Вычислим внутренние усилия:

$$\begin{aligned} N_\alpha &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_\alpha S - k_\alpha J_{x_c} K_\alpha), \\ M_\alpha &= \frac{E J_{x_c}}{1-\mu^2} K_\alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $J_{x_c}$  – момент инерции относительно оси  $x_c$ , проходящей через центр тяжести поперечного сечения. Если не учитывать продольное деформирование стержня, приняв в (5)  $\varepsilon_\alpha = 0$ , тогда выражения (5) (см. [3]), дают зависимость

$$N_\alpha = -k_\alpha M_\alpha, \quad (6)$$

которая будет использована при получении вариационного уравнения.

Для решения краевых задач об изгибе стержня переведем дифференциальные уравнения (1)–(3) в интегральные [5]. Для этого введем вариации перемещений  $\delta u(\alpha)$  и  $\delta w(\alpha)$ .

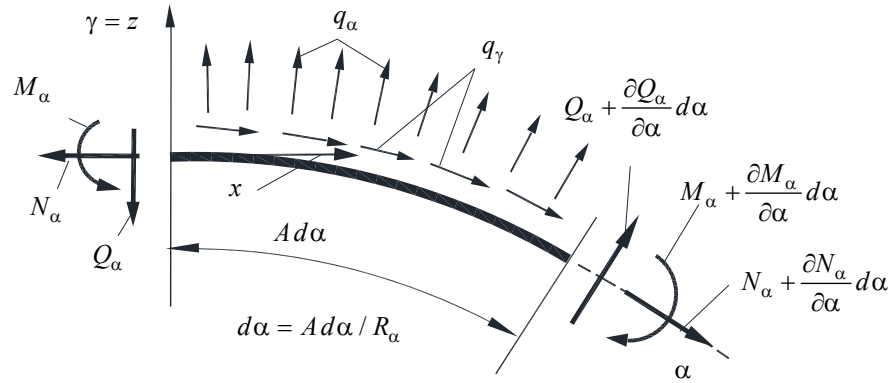


Рис. 1. Элемент криволинейного стержня

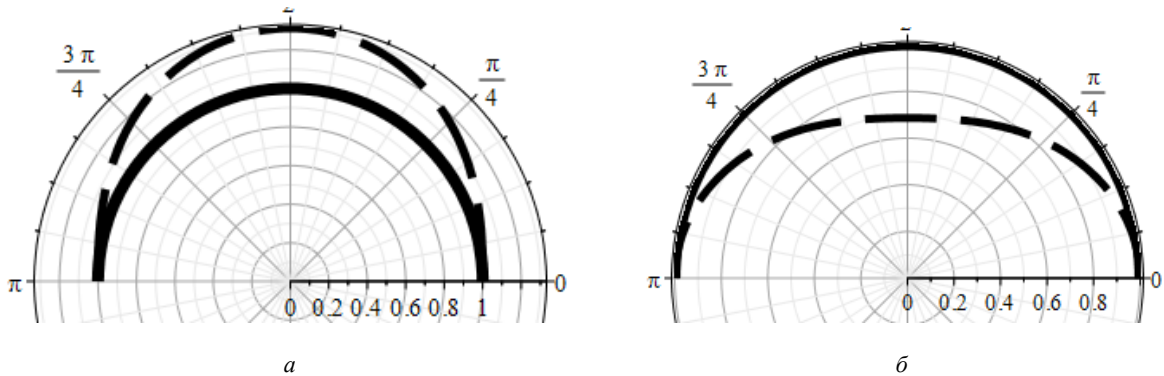


Рис. 2. Деформированный вид арки:  
а – от внутреннего давления; б – от внешнего давления

Выполнив интегрирования по частям, получим

$$\int_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha=\alpha_k} \left[ EJ(\varphi) \left( \frac{1}{A^2} \frac{dA}{d\alpha} \frac{dw}{d\alpha} - \frac{1}{A} \frac{d^2w}{d\alpha^2} - k_\alpha^2 A w \right) \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{1}{A^2} \frac{dA}{d\alpha} \frac{d\delta w}{d\alpha} - \frac{1}{A} \frac{d^2\delta w}{d\alpha^2} - k_\alpha^2 A \delta w \right) - q_\gamma A^2 \delta w \right] d\alpha + \\ + \left[ M_\alpha^* \delta\vartheta - Q_\alpha A \delta w \right]_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha=\alpha_k} = 0. \quad (7)$$

Здесь  $\alpha_0$  и  $\alpha_k$  – пределы интегрирования;  $\delta\vartheta = d\delta w / d\alpha$  – вариация угла поворота.

К примеру, для полярной системы координат, приняв  $\alpha = \varphi$ ,  $A = R$ , уравнение (7) приобретает вид

$$\int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=\varphi_k} \left[ EJ(\varphi) \left( -\frac{1}{R} \frac{d^2w}{d\varphi^2} - \frac{1}{R} w \right) \left( -\frac{1}{R} \frac{d^2\delta w}{d\varphi^2} - \frac{1}{R} \delta w \right) - q_\gamma R^2 \delta w \right] \times \\ \times d\varphi + \left[ M_\varphi^* \delta\vartheta - Q_\varphi R \delta w \right]_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=\varphi_k} = 0. \quad (8)$$

Здесь  $\varphi_0$  и  $\varphi_k$  – начальный и конечный пределы интегрирования.

В качестве примера приведем расчет арки в виде полуокружности, заделанной по торцам. В качестве суммы Ритца выберем полином, который при учете

граничных условий:  $w(0) = 0$ ,  $w(\varphi_k) = 0$  и  $\vartheta(0) = 0$ ,  $\vartheta(\varphi_k) = 0$ , имеет вид

$$w(\varphi) = a_2^* \varphi^2 + a_3^* \varphi^3 + a_i \varphi^i, \quad i = 4 \dots 11, \quad (9)$$

где

$$a_2^* = a_4 \varphi_k^2 + 2a_5 \varphi_k^3 + 3a_6 \varphi_k^4 + 4a_7 \varphi_k^5 + \\ + 5a_8 \varphi_k^6 + 6a_9 \varphi_k^7 + 7a_{10} \varphi_k^8 + 8a_{11} \varphi_k^9,$$

$$a_3^* = -2a_4 \varphi_k - 3a_5 \varphi_k^2 - 4a_6 \varphi_k^3 - \\ - 5a_7 \varphi_k^4 - 6a_8 \varphi_k^5 - 7a_9 \varphi_k^6 - 8a_{10} \varphi_k^7 - 9a_{11} \varphi_k^8.$$

Аналогично соотношениям (9), получаем вариации перемещений.

Приведем расчет полуарки из стали (модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па), радиусом 1 м, трубчатого поперечного сечения. Внешний диаметр трубки 0,01 м; внутренний диаметр – 0,008 м. Прогобы приведем на рис. 2 от распределенной нормальной давления равного 50 Н/м. Эпюры прогибов от внутреннего давления изображены на рис. 2, а, и от наружного давления – на рис. 2, б. Сплошными линиями показана арка, а штриховыми линиями – представлен ее деформированный вид.

При внутреннем давлении изгибающие моменты на контуре получились в десять раз большими, чем при внешнем давлении. Моменты в центральной части арки отличаются на 75 %.

#### Библиографические ссылки

1. Попов Е. П. Нелинейные задачи статики тонких стержней. Л. ; М. : ОГИЗ, 1948. – 170 с.
2. Светлицкий В. А. Механика стержней. Ч. 1. Статика. М. : Высш. шк., 1987. 320 с.
3. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложений в технике. М. ; Л. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949. 783 с.
4. Шалашилин В. И., Горшков А. Г., Трошин В. Н. Сопrotивление материалов : учеб. пособие. М. : МАИ, 2000. 616 с.
5. Ланцош К. Вариационные принципы механики : пер. с англ. М. : Мир, 1965. 408 с.

#### References

1. Popov E. P. Nelinejny`e zadachi statiki tonkix sterzhnej [Nonlinear problems of statics of thin rods]. L. ; Moscow, OGIZ, 1948. 170 p.
2. Svetliczkij V. A. Mexanika sterzhnej [Rod mechanics]. Ch. 1. Statika. Moscow, Vy`ssh. shk., 1987. 320 p.
3. Vlasov V. Z. Obshhaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v texnike. [General theory of shells and its application in technology] Moskva, Leningrad, Gos. Izd-vo texniko-teoreticheskoy literatury, 1949. 783 p.
4. Shalashilin V. I., Gorshkov A. G., Troshin V. N. *Soprotivlenie materialov* [Mechanics of materials] : ucheb. posobie. Moscow, MAI, 2000. 616 p.
5. Lanczosh K. Variacionny`e principy` mexaniki [Variational principles of mechanics] : per. s angl. Moscow, Mir, 1965. 408 p.

© Сабилов Р. А., 2019



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

С. И. Сенашов\*, И. Л. Савостьянова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: sen@sibsau.ru

*На основе известной аналогии между течением вязкопластической жидкости и кручением упругопластических стержней предложена методика построения границы раздела сред для каналов различного сечения. В основе предложенной методики лежат законы сохранения, допускаемые уравнениями, которые описывают процессы.*

*Ключевые слова: законы сохранения, вязкопластическая жидкость.*

## USING CONSERVATION LAWS TO SOLVE THE PROBLEM OF VISCOPLASTIC FLUID FLOW

S. I. Senashov\*, I. L. Savostyanova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: sen@sibsau.ru

*On the basis of the known analogy between the flow of viscoplastic fluid and the torsion of elastic-plastic rods, a method for constructing the interface of media for channels of different cross-section is proposed. The proposed method is based on the conservation laws allowed by the equations that describe the processes.*

*Keywords: conservation laws, viscoplastic fluid.*

Известна аналогия о течении вязкопластической жидкости и кручении упруго-пластического стержня [1]. Известно, что для построения решение, описывающее кручение упруго-пластического стержня достаточно построить упругопластическую границу [2]. Эта задача является сложной и в литературе решена только для некоторых видов профилей поперечного сечения скручиваемого стержня.

В работах автора [3] показана, что такая задача может быть решена с помощью использования законов сохранения, которые строятся для уравнений, описывающих процесс упругопластического кручения. Эта методика опробована для различных профилей поперечного сечения и показала хорошее совпадение с экспериментальными данными [4].

В силу аналогии [1] это означает, что использованная методика [3], позволяет найти неизвестную границу между вязкой и вязкопластической компонентами среды, текущей в канале заданного профиля. Это и означает решение поставленной задачи.

### Библиографические ссылки

1. Varley E. Flows of dilatation fluid. *Quart.Appl. Math.* 1962. Vol. 19, № 4. P. 331–347.

2. Аннин Б. Д., Черепанов Г. П. Упруго-пластическая задача. Новосибирск : Наука, 1983. 239 с.

3. Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Об упруго-пластическом кручении стержня // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 3 (49). С. 100–103

4. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. Elasto-plastic bending of a beam // *Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics*. 2014. № 7 (2). P. 218–223.

### References

1. Varley E. Flows of dilatation fluid. *Quart.Appl. Math.* 1962. Vol. 19, № 4. P. 331–347.

2. Annin B. D., Cherepanov G. P. *Uprugo-plasticheskaja zadacha* [The elastic-plastic task]. Novosibirsk : Nauka, 1983. 239 p.

3. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. [On elastoplastic torsion of a rod] // *Vestnik SibGAU*. 2013. № 3 (49). P. 100–103

4. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. Elasto-plastic bending of a beam // *Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics*. 2014. № 7 (2). P. 218–223.

© Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.. 2019

**МЕТОД РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ  
ИДЕАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ**

С. И. Сенашов\*, И. Л. Савостьянова

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

*Для построения решений используются точечные симметрии, допускаемые уравнениями пластичности в динамическом случае. Эти симметрии позволяют преобразовать точные решения стационарных динамических уравнений в нестационарные решения. В построенные решения входят произвольные функции времени. Приведенное решение позволяет описать пластическое течение между плитами, которые меняют свою форму под действием динамических нагрузок.*

*Ключевые слова: динамические уравнения, идеальная пластичность.*

**METHOD FOR SOLVING DYNAMIC EQUATIONS OF IDEAL PLASTICITY**

S. I. Senashov\*, I. L. Savostyanova

Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: sen@sibsau.ru

*Point symmetries are used to construct solutions in this paper. These point symmetries are allowed by the plasticity equations in the dynamic case. These symmetries allow to transform exact solutions of stationary dynamic equations into non-stationary solutions. Time functions are included in the built solutions. The above solution allows us to describe the plastic flow between the plates, which change their shape under the action of dynamic loads.*

*Keywords: dynamic equations, ideal plasticity.*

В современных и классических статьях и монографиях [1–4] и цитируемой там литературе, рассматриваются статические задачи или одномерные динамические. Это связано не с тем, что динамические задачи не важны для приложений, а с тем, что не разработаны методы для решения динамических задач.

Впервые пространственное решение динамических уравнений пластичности построил Б. Д. Аннин [2] более 40 лет назад. Позднее на основе групповых свойств уравнений были построены точные решения некоторых плоских динамических задач [4]. В этой статье авторы возвращаются к построению точных решений динамических задач теории пластичности. Решения в статье строятся преобразованием стационарных решений в нестационарные.

Пусть  $x = x_1, y = x_2, z = x_3$  – ортогональная декартова система координат;  $u = v_1, v = v_2, w = v_3$  – компоненты вектора скорости деформаций;  $e_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений. Компоненты тензора напряжений и компоненты вектора скорости удовлетворяют уравнениям движения:

$$\frac{dv_i}{dt} = \partial_i \sigma_{ij},$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} - \delta_{ij} p &= \lambda e_{ij} = \lambda(v_{i,j} + v_{j,i})/2, \\ v_{i,i} &= 0, 3p = \sigma_{ii}, \\ (\sigma_{11} - p)^2 + (\sigma_{22} - p)^2 + (\sigma_{33} - p)^2 + \\ &+ 2(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2) = 2k_s^2. \end{aligned} \quad (1)$$

По повторяющимся индексам предполагается суммирование;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\lambda$  – некоторая неотрицательная функция;  $k_s$  – предел текучести при чистом сдвиге.

1. Групповые свойства уравнений динамической теории пластичности

Группа точечных симметрий допускаемых уравнениями (1) порождается следующими операторами [2]:

$$\begin{aligned} X_0 &= \partial_t, M = t\partial_t + x_i \partial_{x_i}, S = \varphi(t) \partial_p, \\ T_i &= f_i(t) \partial_{x_i} + f'_i(t) \partial_{v_i} - x_i f''_i(t) \partial_p, \\ Z_1 &= x_2 \partial_{x_3} - x_3 \partial_{x_2} + v_2 \partial_{v_3} - v_3 \partial_{v_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Еще два оператора  $Z_2, Z_3$  получаются из  $Z_1$  круговой перестановкой индексов. Операторы (2) порождают бесконечномерную алгебру Ли.

Замечательным свойством точечных симметрий (2) является то, что они решение системы (1) снова переводят в точные решения этой же системы.

Пусть  $v_i^1, p^1$  какое-то решение системы (1), тогда

$$\begin{aligned} v_j^2(t, x_1, x_2, x_3) = \\ v_j^1(t, x_1 + a_1 f_1(t), x_2 + a_2 f_2(t), x_3 + a_3 f_3(t)) + a_j f_j'(t), \\ p^2(t, x_1, x_2, x_3) = \\ p^1(t, x_1 + a_1 f_1(t), x_2 + a_2 f_2(t), x_3 + a_3 f_3(t)) - x_i f_i''(t), \end{aligned}$$

по  $j = 1, 2, 3$  не суммировать,  $i = 1, 2, 3$  (3) тоже является точным решением этой же системы. Используем это свойство для построения новых решений системы (1). Здесь  $a_i$  групповые параметры, которые непрерывно меняются в некоторой окрестности нуля.

## 2. Стационарные решения системы (1)

Это решение следует искать в виде

$$\begin{aligned} u &= u(x), \\ v &= v(x), \\ w &= w(x), \\ p &= Ay + Bz + p(x). \end{aligned}$$

Здесь  $A, B$  – произвольные постоянные, а функции  $u, v, w, p$  определяются из системы (1). Имеем

$$u = \text{const}, \sigma_{11} = \text{const}, \sigma_{12} = k_3 \sin \varphi, \sigma_{13} = k_3 \cos \varphi,$$

$$v = \int_{x_1}^x h \sin \varphi dx, w = \int_{x_1}^x h \cos \varphi dx, \quad (4)$$

где

$$\varphi = -\theta + 2 \arctg \left( \sqrt{A^2 + B^2} \exp(x + C) \right),$$

$$\begin{aligned} h = \\ \frac{1}{u} \left( -2 \frac{\sqrt{A^2 + B^2} \exp(x + C)}{1 + (A^2 + B^2) \exp^2(x + C)} \right) \text{tg} \varphi + \\ + \frac{B}{u \cos \varphi}, \text{ если } \cos \varphi \neq 0, \\ \frac{1}{u} \left( 2 \frac{\sqrt{A^2 + B^2} \exp(x + C)}{1 + (A^2 + B^2) \exp^2(x + C)} \right) \text{ctg} \varphi + \\ + \frac{A}{u \sin \varphi}, \text{ если } \cos \varphi = 0. \end{aligned}$$

Это решение можно интерпретировать следующим образом. Имеются две жесткие шероховатые плиты  $x = x_1 = \text{const}, x = x_2 = \text{const}$ . Пластический материал продавливается между ними. На плитах заданы постоянные касательные напряжения  $\sigma_{12}, \sigma_{13}$ .

## 3. Деформация стационарного решения системы (1)

Теперь стационарное решение, построенное в предыдущем пункте без труда, с помощью преобразований (3) деформируем в нестационарные решения исходной системы (1).

Имеем

$$\varphi = -\theta + 2 \arctg \left( \exp(x + a_1 f_1(t) + C) \sqrt{A^2 + B^2} \right),$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{u} \left( -2 \frac{\sqrt{A^2 + B^2} \exp(x + a_1 f_1(t) + C)}{1 + (A^2 + B^2) \exp^2(x + a_1 f_1(t) + C)} \right) \text{tg} \varphi + \\ + \frac{B}{u \cos \varphi}, \text{ если } \cos \varphi \neq 0, \\ h = \\ \frac{1}{u} \left( 2 \frac{\sqrt{A^2 + B^2} \exp(x + a_1 f_1(t) + C)}{1 + (A^2 + B^2) \exp^2(x + a_1 f_1(t) + C)} \right) \text{ctg} \varphi + \\ + \frac{A}{u \sin \varphi}, \text{ если } \cos \varphi = 0. \end{aligned}$$

$$\sigma_{12} = \sin \varphi, \sigma_{13} = \cos \varphi,$$

$$v = \int_{x_1 + a_1 f_1(t)}^{x + a_1 f_1(t)} h \sin \varphi dx, w = \int_{x_1 + a_1 f_1(t)}^{x + a_1 f_1(t)} h \cos \varphi dx.$$

В этом случае касательные напряжения  $\sigma_{12}, \sigma_{13}$  уже не являются постоянными на плитах, как это было в предыдущем пункте, а меняются в зависимости от выбранной функции  $f_1(t)$ , входящей в (5). Такое решение можно использовать для описания течения пластического материала между плитами, которые находятся воздействием вибрационных нагрузок на плиты  $x = x_1 = \text{const}, x = x_2 = \text{const}$ . При этом сами плиты тоже меняют свою форму  $x + a_1 f_1(t) = x_1, x + a_1 f_1(t) = x_2$ . Здесь  $a_1$  – некоторое фиксированное число, если  $a_1 = 0$ , то получаем исходное стационарное решение.

## Библиографические ссылки

1. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. М.: Физматлит, 2001. 704с.
2. Аннин Б. Д., Бытев В. О., Сенашов С. И. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности. Новосибирск: Наука, 1983. 143 с.
3. Polyanin A. D., Zaitsev V. F. Handbook of nonlinear partial differential equations. CRC Press, London, New York: Second Edition. 2012. 1876 p.
4. Сенашов С. И. Об одном классе точных решений уравнений идеальной пластичности // ПМТФ. 1986. № 1. С. 139–142.

## References

1. Ishlinskiy A. Ju., Ivlev D. D. *Matematicheskaja teorija plastichnosti* [Mathematical theory of plasticity] M.: Fizmatlit, 2001. 704 p.
2. Annin B. D., Bytev V. O., Senashov S. I. *Grupovye svoystva uravnenij uprugosti i plastichnosti* [Group properties of elasticity and plasticity equations]. Novosibirsk: Nauka, 1983. 143 p.
3. Polyanin A. D., Zaitsev V. F. Handbook of nonlinear partial differential equations. CRC Press, London, New York: Second Edition. 2012. 1876 p.
4. Senashov S. I. [On a class of exact solutions of ideal plasticity equations] // *PMTF*. 1986. № 1. P. 139–142.

© Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.. 2019

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ФРЕДЕРИКСА НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ МОДЕЛИ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА\*

И. В. Смолехо

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: ismol@icm.krasn.ru

*Работа посвящена численному анализу эффекта Фредерикса на основе математической модели жидкого кристалла как акустической микронегоднородной среды с вращающимися частицами с учетом воздействий электрического поля. Проведены тестовые расчеты.*

*Ключевые слова: жидкий кристалл, динамика, электрическое поле, теория Озеена–Франка, эффект Фредерикса.*

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE FRÉEDERICKSZ EFFECT BASED ON THE ACOUSTIC APPROXIMATION OF A LIQUID CRYSTAL MODEL

I. V. Smolekho

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
E-mail: ismol@icm.krasn.ru

*The work is devoted to numerical analysis of the Fréedericksz effect based on the mathematical model of a liquid crystal as an acoustic microinhomogeneous medium with rotating particles, taking into account the influence of an electric field. Test computations were performed.*

*Keywords: liquid crystal, dynamics, electric field, Oseen–Frank theory, Fréedericksz effect.*

Жидкий кристалл – промежуточное состояние вещества, в котором одновременно проявляются свойства жидкостей и кристаллов [1]. Способность реагировать на изменения температуры, механического напряжения и электромагнитного излучения позволила использовать жидкие кристаллы во многих областях науки и техники, в том числе в аэрокосмической. Сегодняшнюю жизнь сложно представить без жидких кристаллов: они используются в дисплеях мобильных телефонов, компьютеров, в электронных часах и калькуляторах, поэтому необходимо их дальнейшее изучение и внедрение во все сферы деятельности человека. Применение жидких кристаллов раскрывает перспективы в совершенствовании современных технологий и возможности делать их более практичными и экономичными. В основе большинства электрооптических эффектов в жидких кристаллах лежит переориентация молекул под действием электрического поля благодаря анизотропии оптических, электрических и магнитных свойств. Эффект изменения ориентации молекул под действием электрического поля был открыт и исследован Фредериксом [2]. С течением времени молекулы пытаются ориентироваться вдоль электрического поля, но силы упругости стремятся удержать их первоначальное положение. Если величина внешнего поля меньше сил упругости,

то молекулы кристалла сохраняют свою первоначальную ориентацию. Иначе они начинают вращаться, и в конечном итоге ориентируются вдоль поля.

Для оценки неустойчивости равновесия жидкого кристалла применяется статическая теория Озеена–Франка [3; 4]. В этой теории упругая энергия представлена в виде квадратичной формы относительно производных вектора–директора по пространственным координатам. Слой жидкого кристалла помещается между двумя пластинами конденсатора под действием электрического поля. Расстояние между пластинами –  $d$ , угол поворота молекул мал:  $\sin \theta \approx \theta$  и  $\theta(0) = \theta(d) = 0$ . Состояние равновесия соответствует конфигурации, которая минимизирует свободную энергию Озеена–Франка. Вектор-директор  $n = (\cos \theta(y), \sin \theta(y), 0)$  зависит только от  $y$ . Функционал свободной энергии Озеена–Франка выглядит следующим образом:

$$\int_V (F - \frac{1}{2} D \cdot E) dV \rightarrow \min_{\theta},$$

где  $D = \epsilon_0 \epsilon^\perp E + \epsilon_0 (\epsilon^\parallel - \epsilon^\perp)(n \cdot E) n$  – вектор электрической индукции;  $E$  – электрическое поле;  $\epsilon^\parallel$  и  $\epsilon^\perp$  – диэлектрические проницаемости в направлении ориентации молекул жидкого кристалла и в поперечном направлении.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-31-00100.

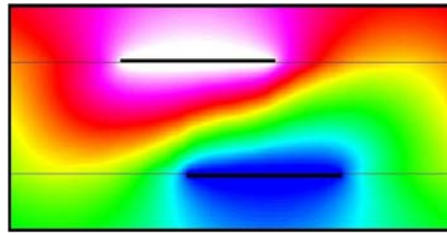


Рис. 1. Возмущение ЖК слоя электрическим полем: линии уровня  $Re(\varphi)$ , 5000-й шаг по времени

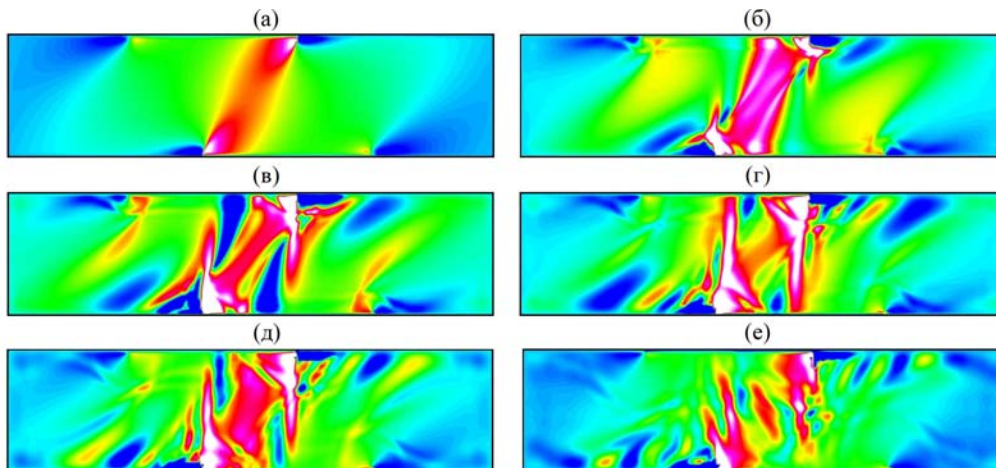


Рис. 2. Возмущение ЖК слоя электрическим полем: линии уровня угла поворота  $\theta$  в разные моменты времени:  
 $a$  – 200-й;  $b$  – 1200-й;  $c$  – 1500-й;  $d$  – 2500-й;  $e$  – 3200-й;  $f$  – 5700-й шаги по времени

Для простоты в расчетах пренебрегают анизотропией модулей упругости, тогда в одноконстантном приближении выражение свободной энергии Озеена–Франка выглядит так:  $F = \gamma [(\nabla \cdot n)^2 + (\nabla \times n)^2]/2$ . Минимизация функционала дает оценку неустойчивости, при которой функционал теряет выпуклость, и соответствующее уравнение Эйлера с указанными выше граничными условиями имеет нетривиальные решения:

$$\varphi^+ - \varphi^- = \pi \sqrt{\frac{\gamma}{\epsilon_0 (\epsilon^{\parallel} - \epsilon^{\perp})}}. \quad (1)$$

При численном анализе эффекта Фредерикса применяется динамическая модель, описывающая термомеханические и электростатические переходные процессы в жидких кристаллах [5; 6]. На рис. 1 и 2 этот эффект наблюдается для жидкого кристалла 5ЦБ. На рис. 1 изображены линии уровня электрического потенциала  $\varphi$ , на рис. 2 – линии уровня угла поворота  $\theta$ . Разность потенциалов  $\varphi^+ - \varphi^-$ , вычисленная по формуле (1), составляет около 2,5 В. При меньших значениях молекулы жидкого кристалла не будут вращаться, при больших значениях, как можно увидеть на рис. 2, молекулы начинают поворачиваться и со временем ориентируются вдоль поля. Размер жидкокристаллического слоя  $20 \text{ мкм} \times 5 \text{ мкм}$ . Пластины конденсатора имеют одинаковую длину  $7 \text{ мкм}$ , координаты левого конца для верхней и нижней пластин –  $5$  и  $8 \text{ мкм}$ , соответственно. Угол наклона молекул  $\theta = 30^\circ$ , диэлектрические проницаемости отличаются в  $5$  раз:  $\epsilon^{\perp} = \epsilon^{\parallel}/5$ . Горизонтальными линиями показаны грани-

цы слоя, жирными линиями – пластины конденсатора. Размерность конечно-разностной сетки в слое  $2048 \times 512$  ячеек, за пределами слоя  $2048 \times 256$  ячеек. Анализ эффекта Фредерикса использовался при тестировании численного алгоритма и компьютерной программы для высокопроизводительных систем с графическими ускорителями.

## References

1. Blinov L. M. Structure and Properties of Liquid Crystals. Heidelberg – New York – Dordrecht – London, Springer, 2011. 439 p.
2. Fréedericksz V., Zolina V. Forces causing the orientation of an anisotropic liquid. *Trans. Faraday Soc.* 1933. Vol. 29. P. 919–930.
3. Oseen C. W. The theory of liquid crystals. *Trans. Faraday Soc.* 1933. Vol. 29. P. 883–899.
4. Frank F. C. On the theory of liquid crystals. *Discuss. Faraday Soc.* 1958. Vol. 25. P. 19–28.
5. Sadovskii V., Sadovskaya O., Smolekho I. Parallel implementation of the algorithm describing the behavior of liquid crystals under the action of electric field. *AIP Conf. Proc.* 2018. Vol. 2025. P. 070005.
6. Sadovskii V., Sadovskaya O. Acoustic Approximation of the Governing Equations of Liquid Crystals under Weak Thermomechanical and Electrostatic Perturbations. In: *Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures*. Vol. 87 of *Advanced Structured Materials*. Cham, Springer. 2018. P. 297–341.

**О РЕШЕНИЯХ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПРОИЗВОЛОМ УРАВНЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ АКУСТИКИ**

Ю. В. Шанько

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: shy70@mail.ru

*Рассмотрены классы точных решений уравнений неоднородной акустики, которые зависят от произвольной функции одной переменной и ее производных до любого заданного порядка.*

*Ключевые слова: уравнение неоднородной акустики, точные решения.*

**ON SOLUTIONS WITH FUNCTIONAL ARBITRARINESS OF THE INHOMOGENEOUS ACOUSTICS EQUATION**

Yu. V. Shan'ko

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation  
E-mail: shy70@mail.ru

*The paper considers classes of exact solutions of inhomogeneous acoustics equations, which depend on an arbitrary function of one variable and its derivatives up to any given order.*

*Keywords: inhomogeneous acoustics equation, exact solutions.*

Известно, что некоторые линейные уравнения в частных производных с тремя независимыми переменными имеют классы частных решений, которые зависят от произвольной гладкой функции одной переменной и ее производных вплоть до любого заданного порядка  $n$ . В качестве примера рассмотрим двумерное волновое уравнение

$$u_{tt} = u_{xx} + u_{yy},$$

которое обладает следующим классом решений:

$$u = f_0(x, y)\varphi^{(n)} + f_1(x, y)\varphi^{(n-1)} + \dots + f_n(x, y)\varphi.$$

Здесь функция  $\varphi = \varphi(x + t)$ , а

$$f_k(x, y) = \left(-\frac{1}{2}\right)^{k\lfloor k/2 \rfloor} \sum_{j=0}^{\lfloor k/2 \rfloor} (-1)^j C_{n-k+j}^j \frac{x^{k-2j}}{(k-2j)!} \frac{y^{2n-2k+2j}}{(2n-2k+2j)!}.$$

В докладе исследуются классы решений с функциональным произволом для уравнения

$$u_{tt} = c^2(x, y)(u_{xx} + u_{yy} - s(x, y)u), \quad (1)$$

к которому сводится двумерное уравнение распространения звука в неподвижной неоднородной среде [1]:

$$\frac{p_{tt}}{\rho c^2} = \left(\frac{p_x}{\rho}\right)_x + \left(\frac{p_y}{\rho}\right)_y.$$

Давление  $p$  зависит от времени  $t$  и декартовых координат  $x$  и  $y$ . Функции  $\rho = \rho(x, y) > 0$  – плотность и  $c = c(x, y) > 0$  – скорость звука считаются заданными. Ищутся точные решения уравнения (1), которые

можно представить в виде линейной комбинации произвольной гладкой функции одного переменного и ее производных до порядка  $n$ . Будут представлены примеры таких решений для  $n > 0$ . Примеры решений для  $n = 0$  рассмотрены в [2; 3].

Данный доклад является продолжением работ автора [2–6].

**Библиографические ссылки**

1. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.
2. Шанько Ю. В. Обобщенные функционально-инвариантные решения двумерного неоднородного волнового уравнения. // Сиб. журн. индустр. матем. 2013. Т. 16, № 1. С. 126–137.
3. Шанько Ю. В. Обобщенные функционально-инвариантные решения двумерного волнового уравнения неоднородной акустики // Решетневские чтения: материалы XVI Междунар. науч. конф. Ч. 2 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 553.
4. Шанько Ю. В. Сплетающие соотношения для двух последовательностей дифференциальных операторов и точные решения одного класса уравнений в частных производных. // Алгебра и логика: теория и приложения: тез. докл. Междунар. конф. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 83–84.
5. Шанько Ю. В. Сплетающие соотношения дифференциальных операторов и точные решения неоднородного волнового уравнения // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.

конф. Ч. 2 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 152–153.

6. Шанько Ю. В. О точных решениях с функциональным произведением неоднородного волнового уравнения // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 33–34.

#### References

1. Brehovskih L. M., Godin O.A. *Akustika sloistyh sred* [Acoustics of layered media]. Moscow, Nauka, 1989 (In Russ.).

2. Shan'ko Yu. V. *Obobshhennye funkcional'no-invariantnye resheniya dvumernogo neodnorodnogo volnovogo uravneniya* [Generalized functionally invariant solutions of the two-dimensional inhomogeneous wave equation] // Sib. Journ. Industr. Math. 2013. Vol. 16, № 1. P. 126–137 (In Russ.).

3. Shan'ko Yu. V. *Obobshhennye funkcional'no-invariantnye resheniya dvumernogo volnovogo uravneniya neodnorodnoj akustiki* [Generalized Functionally Invariant Solutions of 2D Inhomogeneous Acoustic Wave Equation] // *Materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2012. P. 533 (In Russ.).

4. Shan'ko Yu. V. *Spletajushhie sootnosheniya dlja dvuh posledovatel'nostej differencial'nyh operatorov i tochnye resheniya odnogo klassa uravnenij v chastnyh proizvodnyh* [Intertwining relations for the two sequences of differential operators and exact solutions of a class of partial differential equations] // *Algebra i logika: teorija i prilozhenija : tez. dokl. Mezhdunar. konf.* [Materials Intern. Scientific. Conf "Algebra and Logic: Theory and Applications"]. Krasnoyarsk, 2016. P. 83–84 (In Russ.).

5. Shan'ko Yu. V. *Spletayushchie sootnosheniya differentsial'nykh operatorov i tochnye resheniya neodnorodnogo volnovogo uravneniya* [Intertwining Relations of Differential Operators and Exact Solutions of Inhomogeneous Wave Equation] // *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016. P. 152–153 (In Russ.).

6. Shan'ko Yu. V. *O tochnykh resheniyakh s funktsional'nyim proizvolom neodnorodnogo volnovogo uravneniya* [Exact solutions with functional arbitrariness of inhomogeneous wave equation] // *Materialy XXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. Vol. II. P. 33–34 (In Russ.).



**Секция**  
**«ХИМИЯ**  
**И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**



**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СТРОЕНИЯ РАНЕЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ 1-N-ПРОПИЛ  
И 1-ИЗОПРОПИЛЗАМЕЩЕННЫХ 4-АМИНОПИРАЗОЛОВ МЕТОДАМИ  
ЯМР <sup>1</sup>H СПЕКТРОСКОПИИ И ХРОМАТО-МАСС СПЕКТРОМЕТРИИ**

А. В. Андреева, П. С. Бобров, А. В. Любяшкин, М. С. Товбис

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: anastasiya-an-96@mail.ru

*Описан синтез и осуществлено доказательство строения новых 3(5)-метил-5(3)-(1-нафтил)-4-аминопиразолов методами ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопии, а также методами хромато-масс спектрометрии.*

*Ключевые слова: нафтилпиразол, 4-аминопиразол, восстановление, нитрозопиразол, ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопия, хромато-масс спектрометрия.*

**PROOF OF A STRUCTURE OF PREVIOUSLY SYNTHESIZED 1-N-PROPYL  
AND 1-ISOPROPYL-SUBSTITUTED 4-AMINOPYRAZOLES BY <sup>1</sup>H NMR SPECTROSCOPY  
AND CHROMATO-MASS SPECTROMETRY**

A. V. Andreeva, P. S. Bobrov, A. V. Lyubyashkin, M. S. Tovbis

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: anastasiya-an-96@mail.ru

*In this paper the synthesis and proof of the structure of new 3(5)-methyl-5(3)-(1-naphthyl)-4-aminopyrazoles using chromato-mass spectrometry and <sup>1</sup>H NMR spectroscopy.*

*Keywords: naphthylpyrazole, 4-aminopyrazole, hydrogenization, nitrosopyrazole, <sup>1</sup>H NMR spectroscopy, chromato-mass spectrometry.*

Известно, что производные пиразола обладают высокой разнообразной биологической активностью [1; 2]. Введение аминогруппы в 4-е положение данного гетероцикла является перспективным направлением в связи с ее фармакофорностью и возможностью перехода к другим классам соединений [3].

Целью данной работы стало доказательство строения ранее полученных нами новых 4-аминопиразолов [4] методами ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопии и хромато-масс спектрометрии.

Рассматриваемые 3(5)-метил-5(3)-(1-нафтил)-4-амино-1Н-пиразолы были синтезированы по реакции

восстановления 4-нитрозопиразолов гидразингидратом на 0,7 % палладиевом катализаторе в дихлорметане (рис. 1) [5; 6].

Масс-спектры веществ Ia, Ib и IIa записывали на приборе Shimadzu LS/MS-2020 с колонкой RAPTOR ARC-18 100, а для соединения IIb – Finnigan MAT 8200. Спектры ЯМР <sup>1</sup>H регистрировали на приборе Bruker Avance III 600,13 МГц в ДМСО – D6 (Ib, IIa, IIb) и CDCl<sub>3</sub> (Ia). Спектральные данные приведены в таблице.

В качестве примера на рис. 2 изображен ЯМР <sup>1</sup>H спектр соединения IIb.

**Спектральные данные полученных соединений**

Вещество	Масс спектр, m/z (Iотн, %)	ЯМР <sup>1</sup> H, δ, м. д.
Ia	265 (10,69) [M] <sup>+</sup> , 264 (22,91), 170 (2,08), 142 (26,22), 128 (20,08), 114 (2,16)	0,76 – 0,79 т (3H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), 1,67 – 1,72 м (2H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), 2,41 с (3H, CH <sub>3</sub> ), 3,75 – 3,95 м (2H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), 7,54 – 8,06 м (7H <sub>аром.</sub> )
IIa	265 (1,07) [M] <sup>+</sup> , 266 (100), 184 (2,51), 182 (2,38), 143 (7,77), 142 (5,30), 128 (13,19), 100 (19,22), 59 (3,04)	0,89 – 0,92 т (3H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), 1,76 – 1,79 м (2H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), 2,24 с (3H, CH <sub>3</sub> ), 3,98 – 4,01 т (2H, CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), 7,48 – 7,96 м (7H <sub>аром.</sub> )
Ib	265 (100) [M] <sup>+</sup> , 266 (20,42), 250 (24,72), 223 (29,93), 222 (13,01), 181 (10,91), 154 (17,12), 127 (7,91), 18 (16,92)	1,15 – 1,20 д (6H, CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ), 2,16 с (3H, CH <sub>3</sub> ), 3,24 с (2H, NH <sub>2</sub> ), 3,80 – 3,84 м (1H, CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ), 7,44 – 8,03 м (7H <sub>аром.</sub> )
IIb	265 (7,47) [M] <sup>+</sup> , 266 (100), 267 (18,72), 264 (20,20), 169 (1,04), 142 (6,46), 128 (20,01), 99 (0,24)	1,40 – 1,41 д (6H, CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ), 2,23 с (3H, CH <sub>3</sub> ), 3,39 с (2H, NH <sub>2</sub> ), 4,46 – 4,51 м (1H, CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ), 7,48 – 7,95 м (7H <sub>аром.</sub> )

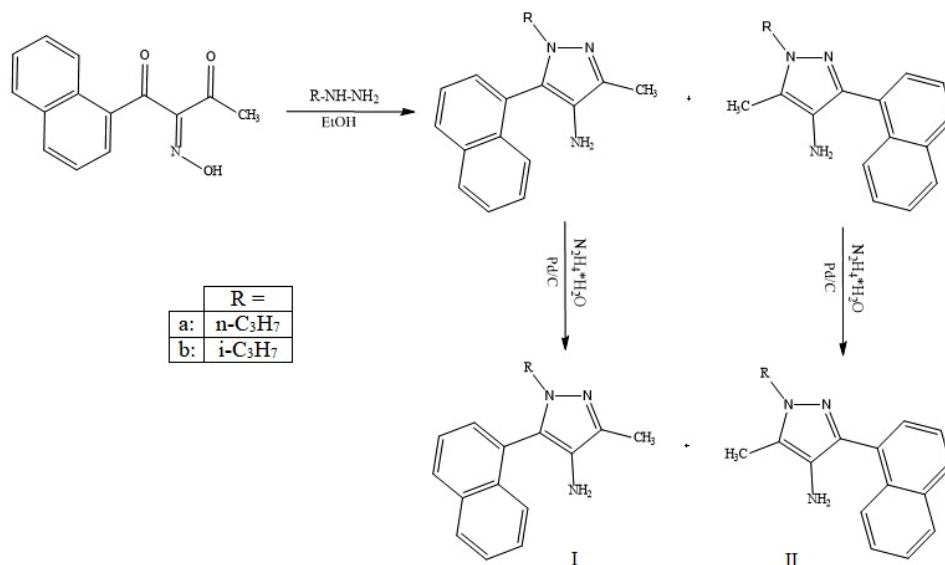
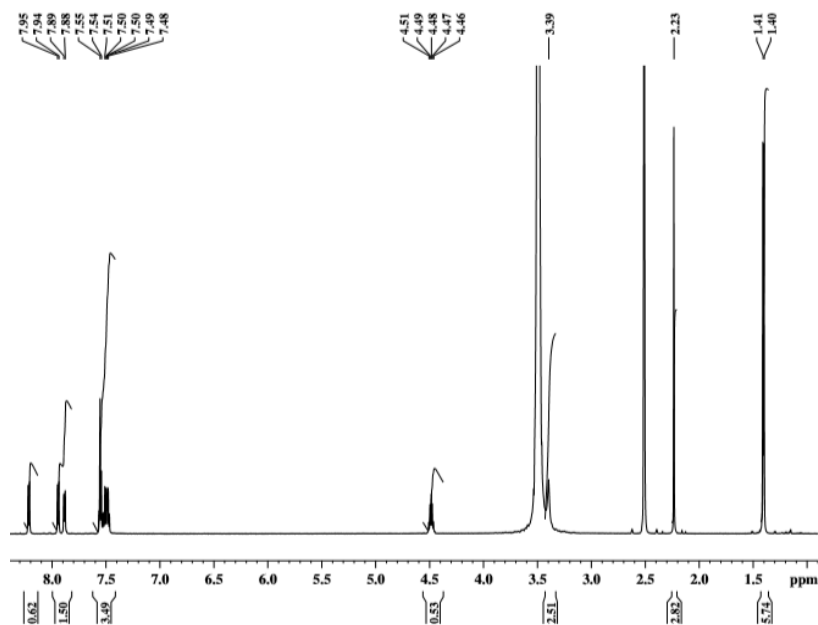


Рис. 1. Синтез 4-аминопиразолов

Рис. 2. ЯМР<sup>1</sup>H спектр 1-изопропилзамещенного 4-аминопиразола (IIb) в ДМСО-d<sub>6</sub>

В области сильного поля 1,40–1,41 м.д. в виде дублета наблюдается сигнал метильных групп изопропильного заместителя. На 2,23 м.д. регистрируются в виде синглета протоны метильного заместителя пиразольного кольца. Атомы водорода в составе аминогруппы регистрируются в виде уширенного синглета в области 3,39 м.д. Септет метиновой группы наблюдается на 4,46–4,51 м.д., а сигналы протонов  $\alpha$ -нафтильного заместителя зарегистрированы в слабом поле (7,54–7,97 м.д.).

#### Библиографические ссылки

1. Alka C., Sharma P. K., Niranjan K. Pyrazole: a Versatile Moiety. *International Journal of ChemTech Research*. 2011. № 3(1). 11 p.

2. Orth R. E. Biologically Active Pyrazoles. *J. Pharm. Sci.* 1968. № 57. P. 537.

3. Фойер Г. Химия нитро- и нитрозогрупп. Т. 2 : пер. с англ. под ред. д-ра хим. наук В. А. Тартаковского. М. : Мир, 1973. 301 с.

4. Андреева А. В., Бобров П. С., Любяшкин А. В. Восстановление  $\alpha$ -нафтилзамещенных 4-нитропиразолов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (17 мая 2018, г. Красноярск) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 256–257.

5. 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.

6. Бобров П. С., Андреева А. В., Любяшкин А. В. Доказательство строения N-алкилзамещенных нитропиразолов с помощью ЯМР спектроскопии // International scientific research 2018 : XLI Междунар. научно-практическая конф. М. : Олимп, 2018. С. 40–43.

#### References

1. Alka C., Sharma P. K., Niranjana K. Pyrazole: a Versatile Moiety. International Journal of ChemTech Research. 2011. № 3(1). 11 p.

2. Orth R. E. Biologically Active Pyrazoles. J. Pharm. Sci. 1968. № 57. P. 537.

3. Foye G. Chemistry of nitro and nitroso groups. Vol. 2. / Per. from English Ed. Doct. Chem. Sciences V. A. Tartakovsky. Moscow, Mir, 1973. P. 301.

4. Андреева А. В., Бобров П. С., Любяшкин А. В. Recovery of  $\alpha$ -naphthyl-substituted 4-nitrosopyrazoles // Young scientists in solving urgent problems of science:

Sat. Vseros materials. scientific-practical conf. students, graduate students and young scientists from the international participation (May 17, 2018, Krasnoyarsk) / under the total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Siberian State University named after M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2018. P. 256–257.

5. Bobrov P. S., Andreeva A. V., Lyubyashkin A. V. Synthesis of 1-Naphthyl-Substituted Nitrosopyrazoles // Reshetnev Readings: Materials of the XXI International scientific conf. (November 8–11, 2017, Krasnoyarsk): at 2 p.m. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Siberian State University named after M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2017. P. 38–39.

6. Bobrov P. S., Andreeva A. V., Lyubyashkin A. V. Proof of the structure of N-alkyl substituted nitrosopyrazoles by NMR spectroscopy // International scientific research 2018. XII Intern. scientific and practical conf. Moscow, Olimp Publishing House, 2018. P. 40–43.

© Андреева А. В., Бобров П. С., Любяшкин А. В., Товбис М. С., 2019

## СИНТЕЗ НОВЫХ АЦЕТИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ 4-АМИНОПИРАЗОЛОВ

А. В. Андреева, П. С. Бобров, А. В. Любяшкин, М. С. Товбис

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
 E-mail: *anastasiya-an-96@mail.ru*

*Настоящее исследование посвящено синтезу 1-*n*-пропил и 1-изопропилзамещенных *N*-(5-метил-3-(1-нафтил)-1*H*-пиразол-4-ил)ацетамидов из ранее полученных 4-аминопиразолов. Доказательство строения осуществляли методами ИК спектроскопии и хромато-масс спектрометрии.*

*Ключевые слова:* 4-ацетамидопиразол, 4-аминопиразол, ацилирование, нафтилпиразол.

## SYNTHESIS OF NEW 4-AMINOPYRAZOLES ACETYL DERIVATIVES

А. V. Andreeva, P. S. Bobrov, A. V. Lyubyashkin, M. S. Tovbis

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: *anastasiya-an-96@mail.ru*

*This investigation is devoted to the synthesis of 1-*n*-propyl and 1-isopropyl substituted *N*-(5-methyl-3-(1-naphthyl)-1*H*-pyrazol-4-yl)acetamides from previously obtained 4-aminopyrazoles. The proof of the structure was carried out by IR spectroscopy and chromatography-mass spectrometry.*

*Keywords:* 4-acetamidopyrazole, 4-aminopyrazole, acylation, naphthylpyrazole.

Гетероциклические соединения являются распространенной темой для исследований в области поиска новых перспективных материалов [1]. В частности, интерес к производным пиразола обусловлен их применением в фармацевтической отрасли, а также в сельском хозяйстве и производстве красителей [1–3].

Синтезированный авторами [4] 4-ацетамидо-замещенный пиразол с ароматическим заместителем в 5-м положении проявил антиаритмическую активность и был рекомендован для дальнейших исследований в качестве сердечно-сосудистого средства.

Данная работа посвящена синтезу новых 4-ацетамидопиразолов из ранее полученных нами аминопипразолов [5].

Синтез аминов осуществляли восстановлением 1-алкилзамещенных 4-нитропиразолов – продуктов реакции циклоконденсации 1-(1-нафтил)бутан-1,2,3-

трион-2-оксима с гидразинами (рис. 1) [6]. Исходный изонитрозодикетон получали по реакции конденсации Кляйзена  $\alpha$ -ацетонафта и этилацетата с последующим нитрозированием дикетона нитритом натрия в ледяной уксусной кислоте [7; 8].

Ранее неизвестные ацетамиды получали ацилированием аминопипразолов уксусным ангидридом (рис. 2) в среде толуола с последующим нагреванием реакционной массы и нейтрализацией избытка ацилирующего агента.

**Экспериментальная часть.** Растворяли 0,2 г 1-алкилзамещенного 5-метил-3-(1нафтил)-4-нитрозо-1*H*-пиразола в 20 мл толуола, затем по каплям при перемешивании вводили уксусный ангидрид. Выдерживали реакционную массу при 80 °С в течение времени, указанного в таблице. Контроль реакции осуществляли методом ТСХ в системе ацетон-толуол (1:2).

## Физико-химические характеристики 4-ацетамидопиразолов

R	Выход, $\eta$ (%)	Время реакции, ч	Избыток уксусного ангидрида, %	$T_{пл}$ , °С	ИК спектр, $\nu$ , $cm^{-1}$	Масс-спектр, m/z (Иотн., %)
<i>n</i> -C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	60	5	250	175	1670 (C=O), 3225 (NH)	308[M+1] <sup>+</sup> (91), 309 (13), 228 (2), 218 (5), 179 (15), 138 (25), 127 (10), 86 (4)
изо-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	73	6	300	157	1675 (C=O), 3250 (NH)	308[M+1] <sup>+</sup> (36), 309 (10), 179 (1), 180 (3), 138 (13), 127 (14), 100 (2), 86 (4)

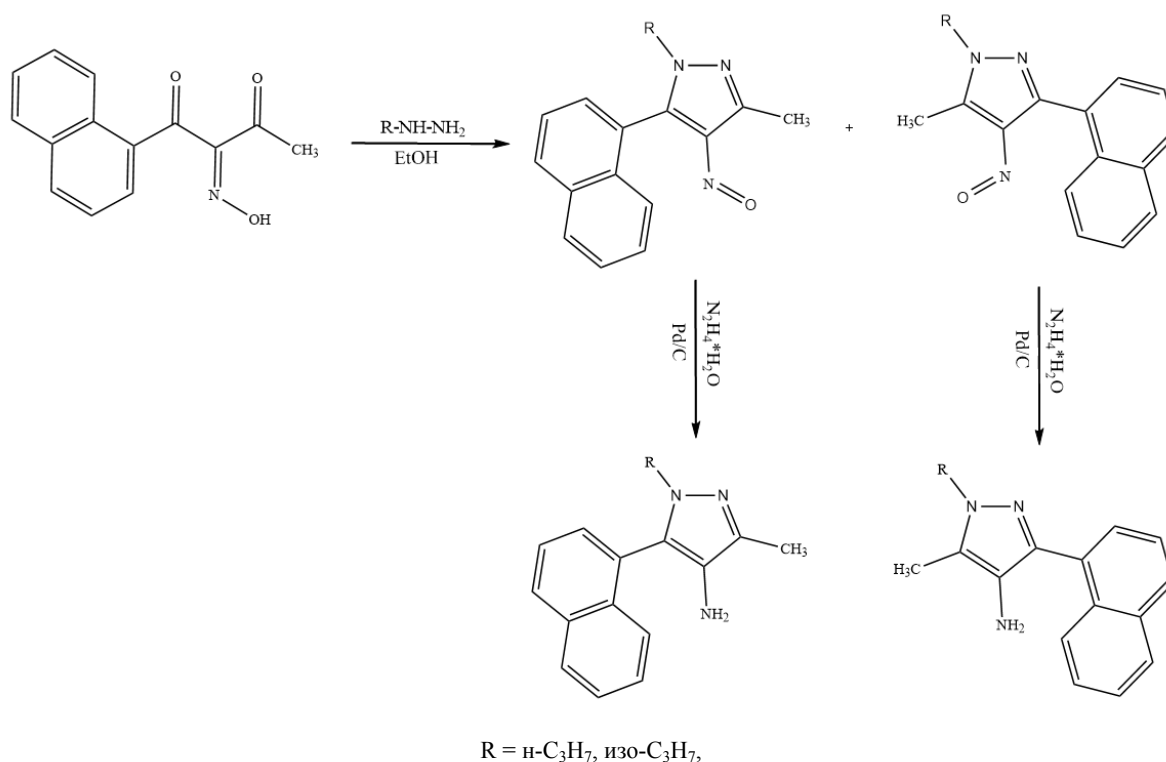


Рис. 1. Синтез исходных 4-аминопиразолов

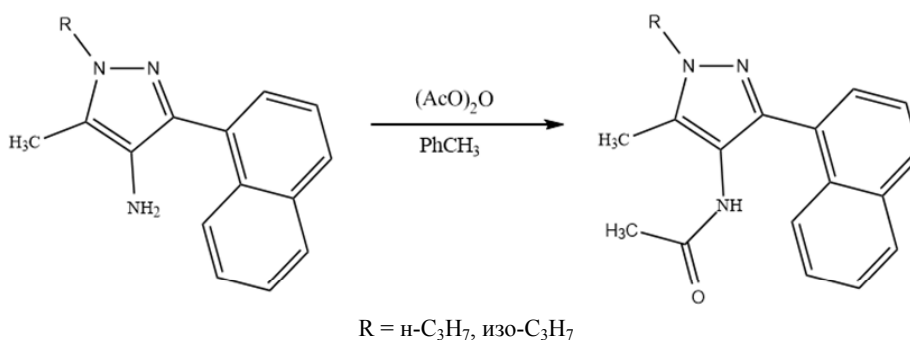


Рис. 2. Получение ранее неизвестных 4-ацетамидопиразолов

После окончания реакции в случае, когда R = изо-C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>, отфильтровывали продукт, представляющий собой белый осадок. Фильтрат промывали 5%-м раствором Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, водой, органический слой сушили Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и упаривали. Сухой остаток объединяли с первой порцией продукта и перекристаллизовывали из толуола.

В случае R = n-C<sub>3</sub>H<sub>7</sub> по окончании реакции раствор промывали 5%-м Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, водой, органический слой сушили Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и упаривали. Сухой остаток перекристаллизовывали из толуола.

#### Библиографические ссылки

1. Alka S., Sharma P. K., Niranjan K. Pyrazole: a Versatile Moiety. International Journal of ChemTech Research. 2011. № 3(1). P. 11.

2. Иванский И. В. Химия гетероциклических соединений : учеб. пособие для ун-тов. М. : Высш. шк., 1978. С. 175–177.

3. Orth R. E. Biologically Active Pyrazoles. J. Pharm. Sci., 1968. 57, 537.

4. Ефимов В. В., Андреева А. В., Бобров П. С. Биологическая активность производных аминопиразола // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Т. 2. С. 7–10.

5. Андреева А. В., Бобров П. С., Любашкин А. В. Восстановление α-нафтилзамещенных 4 – нитрозопиразолов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международ. участием (17 мая 2018, г. Красноярск) / под

общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 256–257.

6. 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.

7. Banchetti A. Gazz. chim. ital. 1940. 70. P. 134–144.

8. Вейгандт-Хильгетаг. Методы эксперимента в органической химии. М. : Химия, 1968. 944 с.

### References

1. Alka C., Sharma P. K., Niranjana K. Pyrazole: a Versatile Moiety. International Journal of ChemTech Research. 2011. № 3(1). P. 11.

2. Ivansky I. V. Chemistry of heterocyclic compounds: Textbook. allowance for un-com. Moscow, Higher. school., 1978. P. 175–177.

3. Orth R. E. Biologically Active Pyraaoles. J. Pharm. Sci., 1968. 57, 537.

4. Efimov B. V., Andreeva A. V., Bobrov P. S. The biological activity of aminopyrazole derivatives // Forest and chemical complexes – problems and solutions : Sat.

Vseros materials. scientific-practical conf. / SibSAU. Krasnoyarsk, 2016. Vol. 2. P. 7–10.

5. Andreeva A. V., Bobrov P. S., Lyubyashkin A. V. Recovery of  $\alpha$ -naphthyl-substituted 4-nitrosopyrazoles // Young scientists in solving urgent problems of science: Sat. Vseros materials. scientific-practical conf. students, graduate students and young scientists from the international. participation (May 17, 2018, Krasnoyarsk) / under the total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Siberian State University named after M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2018. P. 256–257.

6. Bobrov P. S., Andreeva A. V., Lyubyashkin A. V. Synthesis of 1-Naphthyl-Substituted Nitrosopyrazoles // Reshetnev Readings: Materials of the XXI International scientific conf. (November 8–11, 2017, Krasnoyarsk): at 2 p.m. / under total. ed. Yu. Yu. Loginova ; Siberian State University named after M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2017. P. 38–39.

7. Banchetti A. Gazz. chim. ital. 1940. 70. P. 134–144.

8. Weigandt Hilgetag. Experimental methods in organic chemistry. Moscow, Chemistry, 1968. P. 944.

© Андреева А. В., Бобров П. С.,  
Любяшкин А. В., Товбис М. С., 2019

УДК 544.013; 547-304.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЭНЕРГОЕМКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д. В. Антишин\*, А. А. Мирошниченко, М. С. Краснов, А. Е. Толмачева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: Andevl@yandex.ru

*Разработка новых рецептур смесевое твердого ракетного топлива является важной задачей для расширения его применения не только в качестве топлива военных изделий, но и в целях освоения космоса. Для этого необходимы специализированные приборы.*

*Ключевые слова: твердое ракетное топливо, производные нитрогуанидина, эвтектические расплавы, прибор определения температуры затвердевания.*

## STUDY OF EUTECTIC SYSTEMS OF MULTICOMPONENT ENERGY-INTENSIVE MATERIALS

D. V. Antishin\*, A. A. Miroshnichenko, M. S. Krasnov, A. E. Tolmacheva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: Andevl@yandex.ru

*The development of new formulations of mixed solid rocket fuel is an important task for expanding its use not only as a fuel for military products, but also for space exploration. This requires specialized devices.*

*Keywords: Solid rocket fuel, nitroguanidine derivatives, eutectic melts, solidification temperature determination device.*

Эффективность и безопасность метода литьевого формования снарядов и топливных элементов зависит от многих факторов, главные из которых усадка энергоемкого материала в процессе затвердевания и температура затвердевания. Классическим материалом для литья является тротил в виду низкой температуры затвердевания и химической стойкости при проведении процесса формования, безусловным недостатком является высокая температура взрыва и сильно отрицательный кислородный баланс. Более интересным соединением не обладающий такими недостатками является нитрогуанидин, который в качестве компонента ракетного топлива нашел применение в отечественной межконтинентальной баллистической ракете «Нейлон-С» морского базирования Д-6С [1]. Использование в качестве индивидуального литьевого вещества ограничено высокой температурой плавления 232–250 °С (с разл.) [2], при которой процесс становится небезопасным из-за использования высокой температуры формования. Поэтому производные нитрогуанидина, такие как пропилнитрогуанидин с температурой плавления 98,5 °С в настоящее время рассматривается как перспективная основа для литьевых составов [3].

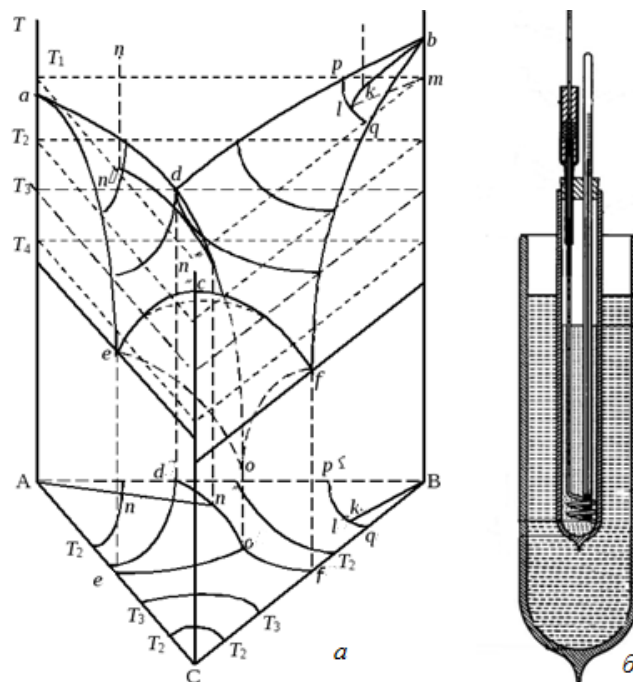
Эвтектические смеси нитрогуанидина с нитратами гуанидина, аммония, этилендиамина, аммониевой солью 3,5-динитро-1,2,4-триазола имеют температуры плавления 98–166 °С и также рассматриваются как

основа для литьевых взрывчатых составов из-за более лучших взрывчатых характеристик чем у пропилнитрогуанидина [4; 5].

При этом подбор и анализ эвтектических расплавов является сложной задачей, в которой важны три параметра: плотность энергоемкого изделия, температура эвтектики, объем усадочной раковины.

Кривую эвтектики двухкомпонентной смеси можно смоделировать по небольшому количеству экспериментальных точек, в то время как для трёхкомпонентной смеси требуется построение номограммы (см. рисунок, а), не говоря уже о трудоемкости расчета эвтектики для четырех и более эвтектических систем [6]. Задача так же осложняется необходимостью подбора оптимального кислородного баланса для различных конфигураций топливных элементов, зачастую не совпадающей с точкой эвтектики многокомпонентной смеси. Все это требует большого экспериментального исследования разноплановых энергоемких материалов по температурам затвердевания как эвтектик пар компонентов смесей, так и энергоемких композиций, а также проверка прогнозируемого снижения точки плавления смеси.

Имеющиеся приборы для определения температуры затвердевания не подходят для решения данных задач, в виду не приспособленности к испытанию взрывчатых веществ и использования других температурных режимов.



Трехмерная модель трехкомпонентной смеси и ее проекция (а) и прибор определения точки затвердевания (б)

Имеющиеся ручные приборы определения температуры затвердевания (см. рисунок, б) имеют также ряд недостатков, главным из которых является трудоемкость и низкая скорость анализа [7]. В связи с этим остро стоит вопрос о создании прибора определения эвтектических точек во взрывозащищенном исполнении. Исполнение основных компонентов базируется на промышленных примерах, так прибор состоит из термоблока со стеклянным цилиндром, снабженным высокоточной термопарой, при этом отсутствует оптическая система регистрирования изменений в виду того, что эвтектика – это смесь твердой фазы, зачастую не пропускающей оптический сигнал, и расплава смеси. В место нее используется рамочная мешалка, с приводом позволяющая точно установить температуры различных динамических вязкостей, за счет увеличения потребляемого тока электродвигателем при увеличении сопротивления перемешиванию пластов. Автоматическая система фиксации точки полной кристаллизации смеси позволяет облегчить работу по исследованию многокомпонентных смесей энергоемких материалов.

Массивный корпус из оргстекла не только защищает от разлета осколков при возможном разрушении стеклянного цилиндра, но и отводит газы разложения энергоемкого материала, при не штатной ситуации, от экспериментатора. Электронная часть представлена микроконтроллером с чипом ATmega, датчиком тока ACS712, температурными датчиками PT-100, коллекторным электродвигателем и драйвером L293D, дисплеем LCD модели HD44780 для вывода данных о температуре и режиме, а также микро SD для записи данных.

Для уменьшения количества необходимых экспериментальных точек, предполагая, что минимальная температура эвтектики смеси будет располагаться в центральной области удобнее использовать методы математической статистики, например метод «крутого восхождения» с движением к минимуму. Получение данных первичной матрицы состояний, а именно выбор процентного соотношения компонентов находится путем наложения на треугольник Гиббса двойной спирали Фибоначчи.

#### Библиографические ссылки

1. Карпенко А. В. Ракетный комплекс Д-6 // Невский бастион. 1999. № 1. 142 с.
2. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ // под ред. Л. Б. Мясниковой. Л. : Химия, 1973. 688 с.
3. Ammon H. L. Updated Atom/Functional Group and Atom\_Code Volume Additivity Parameters for the Calculation of Crystal Densities of Single Molecules, Organic Salts, and Multi-Fragment Materials Containing H, C, B, N, O, F, S, P, Cl, Br, and I // Propellants Explos. Pyrotech. 2008. № 2 (33). P. 92–102.
4. Schmidt A. Thermochemische Tabellen für die Explosivchemie, Z. Gesamte Schiess. Sprengstoffwes. 1934. Vol. 29. P. 259–266.
5. Stinecipher M. M. Eutectic Composite Explosives Containing Ammonium Nitrate // 7th International Detonation Symposium, Anapolis, MD, 16–19 July 1981. P. 801–810.
6. Семиохин И. А. Физическая химия. М. : Изд-во МГУ, 2001. 272 с.



7. ГОСТ ISO 3013–2016. Топлива авиационные. Определение температуры начала кристаллизации и температуры замерзания. М. : Стандартинформ, 2017. 12 с.

#### References

1. Karpenko A. V. [D-6 missile system]. *Nevskiy bastion*. 1999. № 1. 142 p.

2. Orlova E. Yu. *Khimiya i tekhnologiya brizantnykh vzryvchatykh veshchestv* [Chemistry and technology of high explosives] / Pod. red. L. B. Myasnikovoy. L. : Khimiya, 1973. 688 p.

3. Ammon H. L. *Updated Atom/Functional Group and Atom\_Code Volume Additivity Parameters for the Calculation of Crystal Densities of Single Molecules, Organic Salts, and Multi-Fragment Materials Containing H, C, B, N, O, F, S, P, Cl, Br, and I* // *Propellants Explos. Pyrotech.* 2008. № 2 (33). P. 92–102.

4. Schmidt A. Thermochemische Tabellen für die Explosivchemie, *Z. Gesamte Schiess. Sprengstoffwes.* 1934. Vol. 29. P. 259–266.

5. Stinecipher M. M. Eutectic Composite Explosives Containing Ammonium Nitrate // *7th International Detonation Symposium, Anapolis, MD, 16–19 July 1981*. P. 801–810.

6. Semiokhin I. A. *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry]. Moscow, Izd-vo MGU, 2001. 272 p.

7. ГОСТ ISO 3013–2016. Топлива авиационные. Определение температуры начала кристаллизации и температуры замерзания [Aviation fuels. Determination of crystallization start temperature and freezing point]. Moscow, Standartinform Publ, 2017. 12 p.

© Антишин Д. В., Мирошниченко А. А.,  
Краснов М. С., Толмачева А. Е., 2019

## ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 3-ГИДРАЗИНОХИНОКСАЛИН-2(1H)-ОНА С ИЗОНИТРОЗОБЕНЗОИЛАЦЕТОНОМ

П. С. Бобров\*, А. В. Андреева, А. В. Любяшкин, Г. А. Субоч

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: pavel.bobrov96@mail.ru

*Взаимодействием 3-гидразинохиноксалин-2(1H)-она с изонитрозобензоилацетоном впервые получены ранее неизвестные производные хиноксалина. Строение синтезированных соединений доказано современными физическими и физико-химическими методами.*

*Ключевые слова: изонитрозодикетон, 4-нитрозопиразол, циклоконденсация, гидразон, хиноксалин.*

## STUDY OF THE INTERACTION OF 3-HYDRAZINOCINOXALIN-2(1H)-ONE WITH ISONITROZOBENZOYLACETONE

P. S. Bobrov\*, A. V. Andreeva, A. V. Lyubyashkin, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: pavel.bobrov96@mail.ru

*By the interaction of 3-hydrazinoquinoxalin-2(1H)-one with isonitrosobenzoylacetone obtained new derivatives of quinoxaline. The structure of the synthesized compounds is proved by modern physical and physicochemical methods.*

*Keywords: isonitrosodiketone, 4-nitrosopyrazole, cyclocondensation, hydrazone, quinoxaline.*

Производные хиноксалина привлекают внимание многих исследователей, поскольку многие из них обладают высокой биологической активностью и используются для получения лекарственных средств. Так, некоторые соединения, содержащие хиноксалиновый фрагмент используют в медицине в качестве антибактериальных препаратов I [1] и в сельском хозяйстве в качестве пестицидов II-III [2] (рис. 1).

В этой связи активно изучаются методы получения и биологическая активность гидразинохиноксалинов, а также их циклических аналогов. В работе [3] при конденсации бензоилуксусного эфира с 2-фенил-3-гидразинохиноксалином получен пиразолон IV (рис. 1), а его нитрозированием и азосочетанием получены соответствующие 4-нитрозо- и 4-азопиразолон, которые обладают антибактериальной и противогрибковой активностью. Известно, что циклоконденсация 1,3-дикетонов и  $\beta$ -кетозэфиров с 3-гидразино-хиноксалин-2(1H)-оном даёт пиразолы V и пиразолон VI (рис. 1) [4], обладающие бактерицидными свойствами.

Кроме биологической активности, гетероароматические соединения подобного строения, содержащие активные функциональные группы могут с успехом проявлять свойства модификаторов полимерных материалов, используемых в ракетной технике и твёрдом ракетном топливе.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что поиск и разработка методов синтеза новых функционализированных производных хиноксалилпиразольного ряда является актуальной задачей.

Ранее нами было показано, что взаимодействие 3-гидразинохиноксалин-2(1H)-она VII с изонитрозодикетонами в кислой среде может приводить как к образованию гидразонов, так и к образованию 4-нитрозопиразолов, в зависимости от строения исходного изонитрозодикетона [5; 6]. До сих пор не была исследована конденсация 3-гидразинохиноксалин-2(1H)-она с изонитрозобензоилацетоном VIII. Изучение этой реакции позволит получить более широкий ряд перспективных соединений хиноксалинового ряда и определить препаративные возможности исследуемой циклоконденсации.

Для достижения поставленной цели синтезировали исходный 3-гидразинохиноксалин-2(1H)-он [7] и изонитрозобензоилацетон [8].

Нами впервые было показано, что изонитрозобензоилацетон и 3-гидразинохиноксалин-2(1H)-он успешно конденсируются в ледяной уксусной кислоте при 60 °С с образованием ранее неизвестного 2-(гидроксиимино)-3-(2-(3-гидроксихиноксалин-2-ил)гидразино)-1-фенилбутан-1-она IX с количественным выходом (рис. 2).

Циклизация промежуточного гидразона IX в 4-нитрозопиразол X происходит в более жестких условиях, при 118 °С. Выделенный продукт циклоконденсации представляет собой сине-зелёное кристаллическое вещество, растворимое в этаноле и ДМСО. Строение полученных соединений подтверждают результаты электронной, ИК-, ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопии и хромато-масс спектрометрии.

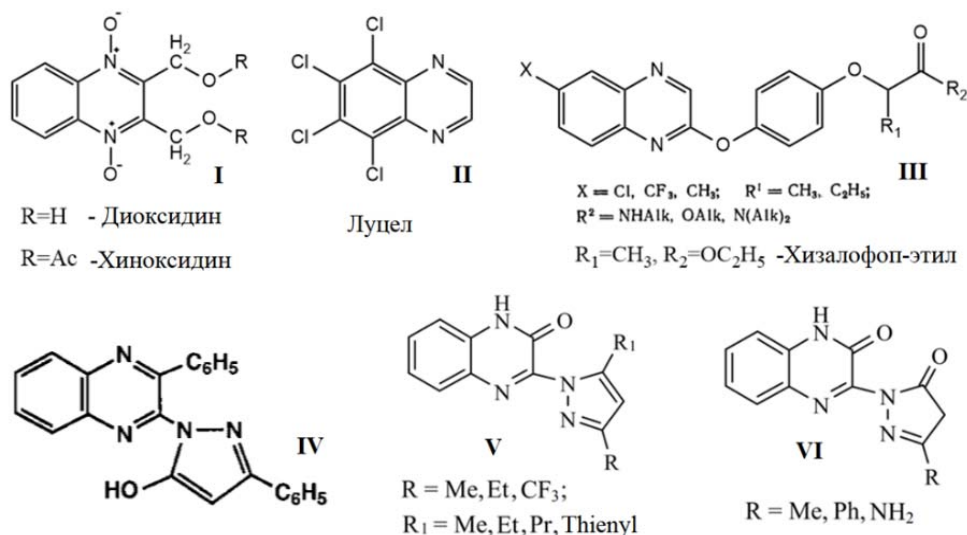


Рис. 1. Биологически активные производные хиноксалина

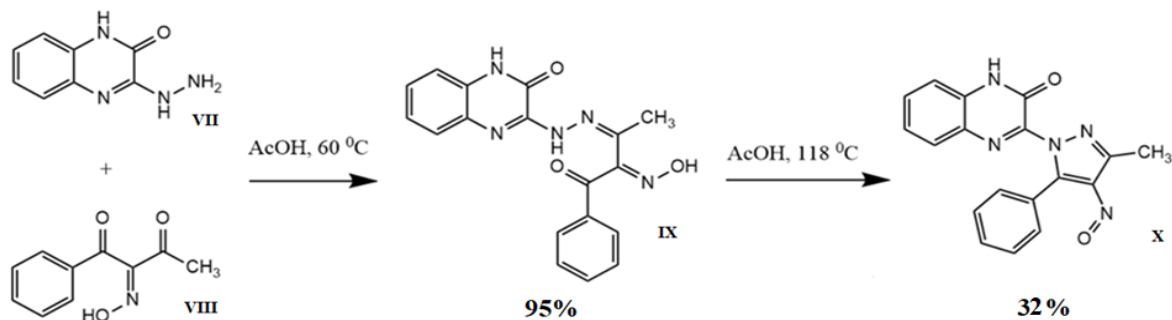


Рис. 2. Конденсация хиноксалилгидразина с изонитрозобензоилацетоном

Таким образом, изученный синтез позволил своеобразным путём ввести в структуру хиноксалилзамещённого пиразола нитрозогруппу, активность которой позволит исследовать модифицирующую способность в твёрдом ракетном топливе.

*2-(гидроксиимино)-3-(2-(3-гидроксихиноксалин-2-ил)гидразино)-1-фенилбутан-1-он (IX)*. Смесь 3-гидразинохиноксалин-2(1H)-она (0.4 г, 2.27 ммоль) с изонитрозобензоилацетоном (0.43 г, 2.27 ммоль) перемешивали 1 ч при 60 °С в уксусной кислоте (7 мл). Осадок отфильтровывали, промывали уксусной кислотой и водой, сушили на воздухе. Желтые кристаллы, растворимые в горячем этаноле и тетрагидрофуране,  $T_{пл} = 170-173$  °С (разл.), выход 0,745 г (95 %). Электронный спектр,  $\lambda_{max}$ , нм: 447, 517. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $cm^{-1}$ : 3350, 3050, 1681, 1606, 1566, 1413, 1246, 1100, 965, 756, 703. Хромато-масс спектр,  $m/z$  ( $I_{отн}$ , %): 349 (40)  $[M]^+$ , 348 (100).

*1-(хиноксалин-2(1H)-он-3-ил)-3-метил-5-фенил-4-нитрозо-1H-пиразол (X)*. Суспензию гидразона IX (0.1 г, 0.29 ммоль) в ледяной уксусной кислоте (2 мл) кипятили 60 минут, образовавшийся зелёный раствор выливали в холодную воду, осадок отфильтровывали, промывали водой и сушили на воздухе. Очистку про-

дукта осуществляли на колонке с силикагелем, в системе толуол – ацетонитрил (9:1), выход 0,03 г (32 %). ЯМР  $^1H$  (ДМСО- $d_6$ ),  $\delta$ , м.д.: 2.23 с (3H,  $CH_3$ ), 7.41 – 7.58 м (5H, Ph), 7.70 – 7.88 м (4H, Quinox.), 13.11 с (1H, NH).

#### Библиографические ссылки

1. Машковский М. Д. Лекарственные средства : Пособие по фармакологии для врачей. Т. 2. М. : Новая Волна, 2002. 608 с.
2. Мельников М. Н. Пестициды. Химия, технология и применение. М. : Химия. 1987. 712 с.
3. El-Hawash S. A., Habib N. S. and Fanaki N. H. Quinoxaline derivatives part II: Synthesis and antimicrobial testing of 1,2,4-triazolo[4,3-a]quinoxalines, 1,2,4-triazino[4,3-a]quinoxalines and 2-pyrazolylquinoxalines // Pharmazie. 1999. № 11. P. 808–813.
4. Microwave-assisted synthesis and antibacterial activity of some pyrazol-1-yl-quinoxalin-2(1H)-one derivatives / O. A. Olayinka, A. O. Craig, O. I. Chinwe, O. O. Kehinde and C. N. Obinna // Chemistry of Heterocyclic Compounds. 2009. Vol. 45, № 11. P. 1370–1378.

5. Циклоконденсация изонитрозоацетилацетона с 3-гидразиноксалин-2-олом / П. С. Бобров, А. В. Андреева, А. В. Любяшкин, Г. А. Субоч // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : Всерос. науч.-практ. конф. сб. ст. студентов и молодых ученых ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 260–262.

6. Бобров П. С., Андреева А. В., Любяшкин А. В. Изучение взаимодействия 3-гидразиноксалин-2(1H)-она с изонитрозо- $\alpha$ -нафтоилацетоном // Теория и практика современной науки : Междунар. науч.-практ. журн. Саратов : Институт управления и социально-экономического развития, 2019. № 8 (50).

7. Cheeseman G. W. H., Rafiq M. Quinoxalines and related compounds. Part VIII. The reactions of quinoxaline-2(1H)-ones and -2,3(1H,4H)-diones with hydrazine // Journal of the Chemical Society C: Organic. 1971. P. 452–454.

8. Wolff L. Ueber Diazoanhydride // Justus Liebigs Ann. Chem. 1902. 325. P. 136.

### References

1. Mashkovsky M. D. Medicines : A guide to pharmacology for doctors. Vol. 2. Moscow, New Wave Publishing House LLC. 2002. 608 p.

2. Melnikov M. N. Pesticides. Chemistry, technology and application. Moscow, Chemistry, 1987. 712 p.

3. El-Hawash S. A., Habib N. S. and Fanaki N. H. Quinoxaline derivatives part II: Synthesis and antimicrobial testing of 1,2,4-triazolo[4,3-a]quinoxalines, 1,2,4-triazino[4,3-a]quinoxalines and 2-

pyrazolylquinoxalines // Pharmazie. 1999. № 11. P. 808–813.

4. Microwave-assisted synthesis and antibacterial activity of some pyrazol-1-yl-quinoxalin-2(1H)-one derivatives / O. A. Olayinka, A. O. Craig, O. I. Chinwe, O. O. Kehinde and C. N. Obinna // Chemistry of Heterocyclic Compounds. 2009. Vol. 45, № 11. P. 1370–1378.

5. Cyclocondensation reaction of isonitrosoacetylacetone with 3-hydrazinylquinoxalin-2-ol / P. S. Bobrov, A. V. Andreeva, A. V. Lyubyashkin, G. A. Suboch // Young scientists in solving actual problems of science : Vseros. scientific-practical conf. Collection of articles by students and young scientists ; Siberian State University named after M.F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2018. P. 260–262.

6. Bobrov P. S., Andreeva A. V., Lyubyashkin A. V. Study of the interaction of 3-hydrazinokinoxalin-2(1H)-one with isonitroso- $\alpha$ -naphthoylacetone // Theory and practice of modern science. International scientific and practical journal. Saratov : Institute of Management and Socio-Economic Development LLC, 2019. No. № 8 (50).

7. Cheeseman G. W. H., Rafiq M. Quinoxalines and related compounds. Part VIII. The reactions of quinoxaline-2(1H)-ones and -2,3(1H,4H)-diones with hydrazine // Journal of the Chemical Society C: Organic. 1971. P. 452–454.

8. Wolff L. Ueber Diazoanhydride // Justus Liebigs Ann. Chem. 1902. 325. P. 136.

© Бобров П. С., Андреева А. В., Любяшкин А. В., Субоч Г. А., 2019

УДК 541.127:662.1

## КАТАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ 1,3,5,7-ТЕТРАНИТРО-1,3,5,7-ТЕТРААЗАЦИКЛООКТАНА

Л. А. Круглякова\*, К. В. Пехотин, О. А. Голубцова, Е. А. Белова, А. Е. Ломачко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lakruglyakova@sibsau.ru

*Модификация некоторыми солями молибденовой и ванадиевой кислот ускоряет термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ), энергетического компонента смесевых твердых ракетных топлив.*

*Ключевые слова: катализ, термическое разложение, 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктан, соли молибденовой и ванадиевой кислот.*

## THERMAL DECOMPOSITION CATALYSIS OF 1,3,5,7-TETRANITRO-1,3,5,7-TETRAAZACYCLOOCTANE

L. A. Kruglyakova\*, K. V. Pekhotin, O. A. Golubtsova, E. A. Belova, A. E. Lomachko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lakruglyakova@sibsau.ru

*Modification with some salts of molybdenum and vanadium acids accelerates thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane, using as the energetic component of mixed solid rocket propellants.*

*Keywords: catalysis, thermal decomposition, 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane, acid salts of molybdenum and vanadium acids.*

**Введение.** Актуальной задачей при использовании циклических нитрамин в составах смесевых твердых ракетных топлив является подбор специальных добавок, позволяющих регулировать скорость термического разложения, а, следовательно, и горения компонентов ТРТ. Поиск эффективных катализаторов термораспада в течение длительного времени привлекает интерес исследователей [1–5]. Установлено, что механизм ускоряющего действия в зависимости от типа добавки может быть различным. В продолжение работ [6–8] изучено влияние добавок молибдата кобальта ( $\text{Co}^{2+}$ ) и ванадата меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ) на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана (НМХ) в твердой фазе.

**Результаты и их обсуждение.** Образцы для изучения кинетики термического разложения готовили путем совместной кристаллизации из ацетона. Соотношение добавка: НМХ составляла 5:95 (масс. ч.). Подробная методика нанесения добавок описана в работах [2; 5]. Кинетику термического разложения изучали в изотермических условиях манометрическим методом в вакууме.

Исследование кинетики термического разложения образцов НМХ с добавками показало, что распад протекает, как и в случае чистого НМХ, с ускорением и характеризуется S-образными кинетическими кривыми (рис. 1). Рассчитанные по температурной зависимости констант скорости активационные параметры

приведены в таблице. Здесь же для сравнения представлены полученные ранее [6–8] данные о влиянии других добавок на распад НМХ.

Первичной стадией некаталитического распада НМХ является гомолитический разрыв связи  $\text{N-NO}_2$ . Процесс протекает медленно. Известно, что соли и оксиды металлов переменной валентности часто являются эффективными катализаторами гетерогенных реакций, действуя по окислительно-восстановительному механизму катализа. Данные рис. 2 и таблицы свидетельствуют о том, что добавки молибдата кобальта и ванадата меди вдвое увеличивают скорость термораспада НМХ и уменьшают индукционный период до начала ускорения. При этом добавка первого, хотя и дает несколько меньшее увеличение начальной скорости термораспада, однако ускорение распада в этом случае наступает быстрее. Увеличение скорости распада связано с уменьшением активационных параметров реакции. Различие в действии катализаторов может быть следствием разной способности металлов в составе добавки к передаче электронов в процессе каталитического превращения.

Из таблицы видно, что на скорость реакции влияет как катион, так и анион добавки. Сравнение кинетических характеристик распада молибдата кобальта с аналогичными данными для молибдата аммония показывает, что аммонийная соль обладает более сильным каталитическим действием.

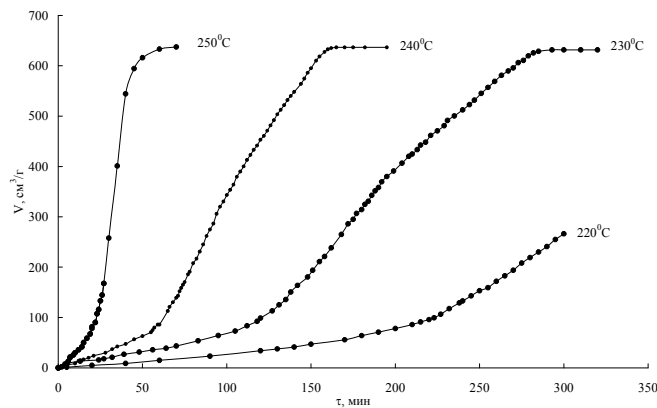


Рис. 1. Кинетические кривые термораспада НМХ с добавкой  $\text{Cu}_3(\text{VO}_4)_2$

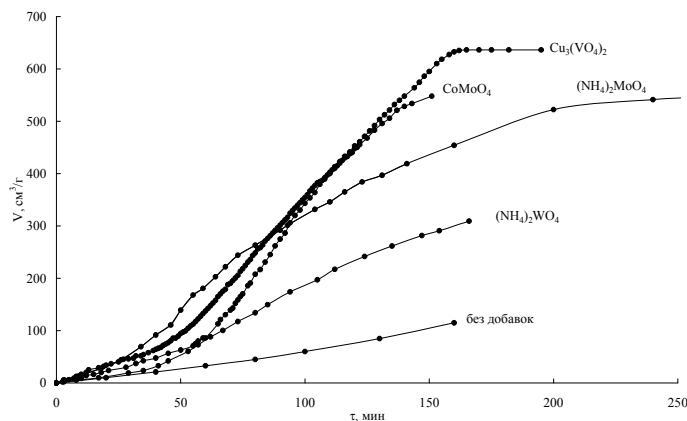


Рис. 2. Влияние различных добавок на термическое разложение НМХ

#### Кинетические параметры термического разложения НМХ с добавками различных солей

№	Соединение	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$w_{\text{Н}_2}$ $\text{cm}^3/(\text{г}\cdot\text{мин})$		$E_{\text{ак}},$ кДж/моль	$\lg A$	$\tau_{\text{инд}}, \text{мин}$	
			210 $^\circ\text{C}$	240 $^\circ\text{C}$			210 $^\circ\text{C}$	240 $^\circ\text{C}$
1	НМХ без добавок (взято из [2])	200–250	0,023	0,588	225,3	18,28	780	100
2	НМХ + $\text{CoMoO}_4$	220–250	–	1,14	218,8	17,68	–	51
3	НМХ + $\text{Cu}_3(\text{VO}_4)_2$	220–250	–	1,24	193,3	14,95	–	60
4	НМХ + $(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$	210–240	0,039	0,67	192,1	14,88	400	40
5	НМХ + $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	210–240	0,093	1,58	191,1	15,15	230	30
6	НМХ + $(\text{NH}_4)\text{NTriNM}^*$	210–240	0,082	1,20	202,8	19,94	430	38
7	НМХ + $\text{Co}_2[\text{O}_2\text{NN}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2]_3$	210–250	0,21	2,86	177,2	13,50	450	35

\* Аммонийная соль 3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил-нитрометана.

Причиной этого, вероятно, является образование аммиака в ходе разложения добавки [7], который атакует нуклеофильные центры молекулы НМХ, способствуя более глубокой его деструкции. На возможность основного катализа распада НМХ указывают повышенные скорости распада НМХ в присутствии солей 4-нитро-4-азапептан-1,7-диовой кислоты [8]. Влияние природы катиона добавки на скорость и механизм термораспада НМХ требует дальнейшего исследования. Модификация НМХ различными добав-

ками позволит регулировать скорость термического разложения и горения топлив, содержащих НМХ.

#### Библиографические ссылки

1. Fifer R. A., McBratney W. F. Catalysis of nitramine propellants by metal borohydrides, ARBRL-MR-0330. 1983.
2. Effect of Metal Formiates and Oxalates on HMX Decomposition / R. S. Stepanov, L. A. Kruglyakova,

A. M. Astakhov, K. V. Pekhotin // *Comb., Expl. and Shock Waves*. 2004. Vol. 40. P. 576–579.

3. Синдицкий В. П. К вопросу о механизме горения октогена // *Физика горения и взрыва*. 2011. Т. 47, № 5. С. 58–62.

4. Влияние диоксида титана на термическое разложение октогена / Н. В. Муравьев, А. Н. Пивкина, А. Н. Стрелецкий и др. // *Горение и взрыв*. 2013. Вып. 6. С. 195–200.

5. Степанов Р. С., Круглякова Л. А., Пехотин К. В. Влияние солей пропионитрилнитрамина на термическое разложение октогена // *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36, № 5. С. 74–77.

6. Влияние соединений молибдена и вольфрама на термическое разложение 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана / К. С. Аревкова, А. В. Вдовин, О. А. Голубцова и др. // *Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. статей по материалам Всеросс. научно-практ. конф. Т. 2. Красноярск : СибГТУ, 2015. С. 3–5.*

7. Влияние ониевых солей 3-нитро-1,2,4-триазола и 3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил-нитрометана на термическое разложение октогена / А. В. Вдовин, О. А. Голубцова, К. В. Пехотин, Л. А. Круглякова // *Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов : VI Всеросс. научно-техн. конф. молодых ученых. Бийск, 2016. С. 104–107.*

8. Влияние солей 4-нитро-4-азагептан-1,7-диовой кислоты на термическое разложение октогена / Л. А. Круглякова, К. В. Пехотин, О. А. Голубцова и др. // *Решетневские чтения : XXI Междунар. научно-практ. конф., посвященной памяти акад. им. М. Ф. Решетнева. 2017. Красноярск. Ч. 2. С. 67–69.*

### References

1. Fifer R. A., McBratney W. F. Catalysis of nitramine propellants by metal borohydrides, ARBRL-MR-0330. 1983.

2. Effect of Metal Formiates and Oxalates on HMX Decomposition / R. S. Stepanov, L. A. Kruglyakova, A. M. Astakhov, K. V. Pekhotin // *Comb., Expl. and Shock Waves*. 2004. Vol. 40. P. 576–579.

3. Sinditsky V. P. To Question about Octogen Burning Mechanism // *Comb., Expl. and Shock Waves*. 2011. Т. 47. № 5. С. 58–62.

4. Effect of titanium dioxide on the thermal decomposition of octogen / N. V. Muraviev, A. N. Pivkina, A. N. Streletsky et al. // *Burning and explosion*. 2013. Vol. 6. P. 195–200.

5. Stepanov R. S., Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V. Effect of Propionitrile Nitramine Salts on Thermal Decomposition of HMX // *Comb., Expl. and Shock Waves*. 2000. Vol. 36. № 5. P. 618–621.

6. Effect of molybdenum and wolframium compounds on thermal decomposition of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacycloktocane / K. S. Arevkova, A. V. Vdovin, O. A. Golubtsova et al. // *Forest and chemical complexes – problems and decisions. Collected articles on Materials of all-russian science-pract. conf. Vol. 2. Krasnoyarsk : SibGTU, 2015. P. 3–5.*

7. Effect of onium salts of 3-nitro-1,2,4-triazole and 3-nitro-1,2,4-triazole-1-yl-nitromethane on the thermal decomposition of octogen / A. V. Vdovin, O. A. Golubtsova, K. V. Pekhotin, L. A. Kruglyakova // *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.*

8. Effect of 4-nitro-4-azaheptane-1.7-dibasic acid salts on the thermal decomposition of octogen / L. A. Kruglyakova, K. V. Pekhotin, O. A. Golubtsova et al. // *Reshetnev readings. XXI Int. science-pract. conf. dedicated to the memory of ac. M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk. 2017. P. 2. P. 67–69.*

© Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Голубцова О. А., Белова Е. А., Ломачко А. Е., 2019

## СИНТЕЗ ПРОИЗВОДНЫХ N-3-НИТРОБЕНЗЕЛИДЕНХИНОЛИН-5-АМИНОВ

Е. Ю. Курочкина, С. Н. Селина, Н. А. Гаврилова, Г. А. Субоч

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

*Основания Шиффа на основе ароматических и гетероциклических аминов и ароматических альдегидов находят применение в качестве стабилизирующих присадок к топливам, смазочным маслам и полимерным композициям. Взаимодействием N<sup>8</sup>-замещенных 5,8-хинолиндиаминов с 3-нитробензальдегидом получены ранее неизвестные основания Шиффа N-3-нитробензелиденхинолин-5-амины, строение подтверждено с помощью различных методов спектрального анализа.*

*Ключевые слова: основания Шиффа, 5,8-хинолиндиамины, 3-нитробензальдегид N-3-нитробензелиденхинолин-5-амины.*

## SYNTHESIS OF N-3-NITROBENZYLIDENQUINOLIN-5-AMINES DERIVATIVES

E. Y. Kurochkina<sup>1</sup>, S. N. Selina, N. A. Gavrilova, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: nataliagavrilova@yandex.ru

*Schiff bases based on aromatic and heterocyclic amines and aromatic aldehydes are used as stabilizing additives for fuels, lubricating oils and polymer compositions. By the interaction of N<sup>8</sup>-substituted 5,8-quinolinediamines with 3-nitrobenzaldehyde, previously unknown Schiff bases of N-3-nitrobenzylidenequinolin-5-amines were obtained, the structure was confirmed using various spectral analysis methods.*

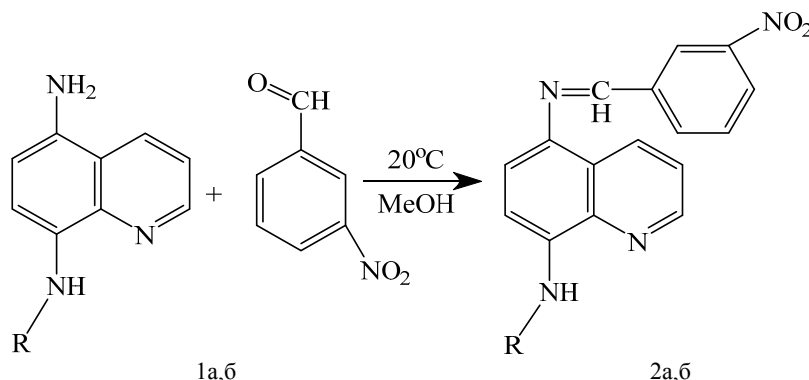
*Keywords: Schiff bases, 5,8-quinolinediamines, 3-nitrobenzaldehyde N-3-nitrobenzylidenequinoline-5-amines.*

Основания Шиффа на основе ароматических и гетероциклических аминов и ароматических альдегидов находят применение в качестве стабилизирующих присадок к моторным топливам, смазочным маслам [1] и полимерным композициям [2]. Термостабилизирующие и антиокислительное действие повышается при наличии у присадок комплексообразующих свойств, так как в этом случае отмечается значительный синергетический эффект совместного действия дезактиваторов металлов и антиоксидантов [1].

Ранее мы сообщали о синтезе N<sup>8</sup>-замещенных 5,8-хинолиндиаминов [3].

Известно, что производные 8-аминохинолинов обладают комплексообразующими свойствами [4; 5].

С целью синтеза ранее неизвестных оснований Шиффа с комплексообразующими свойствами, мы исследовали взаимодействие N<sup>8</sup>-замещенных 5,8-хинолиндиаминов (1а,б) с 3-нитробензальдегидом (см. рисунок).



Взаимодействие N<sup>8</sup>-замещенных 5,8-хинолиндиаминов с 3-нитробензальдегидом:  
 1а, 2а R = -n-OCH<sub>3</sub>-Ph; 1б, 2б R = -CH(CH<sub>3</sub>)-Ad



Для получения соответствующих оснований Шиффа, растворяли N<sup>8</sup>-замещенные-5,8-хинолин-диамины в метаноле и при интенсивном перемешивании добавляли метанольный раствор эквимолярного количества мета-нитробензоальдегида. Контроль за ходом реакции осуществляли с помощью метода ТСХ. Смесь перемешивали 1 час, образовавшийся коричневый осадок отфильтровали.

Данные ЯМР<sup>1</sup>H спектроскопии подтверждают, что полученные соединения представляют собой основания Шиффа N-3-нитробензелиденхинолин-5-амины 2а,б.

В спектре ЯМР <sup>1</sup>H соединения 2а наблюдаются пять сигналов протонов хинолинового фрагмента в области 7.23–8.95 м.д. Протоны п-анизидинового фрагмента наблюдаются в виде характерного для пара-замещенных бензолов дублета-дублетов. Протоны мета-замещенного бензольного кольца связанного с углеродом иминогруппы дают четыре сигнала в области 7.69–8.74 м.д. Протон С-Н связи иминогруппы дает сигнал при 8.85 м.д. Синглет протона вторичной ароматической аминогруппы наблюдается в виде уширенного синглета при 8.14 м.д. Протоны метокси-группы дают сигнал при 3.88 м.д.

Таким образом, взаимодействием N<sup>8</sup>-замещенных 5,8-хинолиндиаминов с 3-нитробензальдегидом нами получены ранее неизвестные N-3-нитробензелиденхинолин-5-амины.

#### Библиографические ссылки

1. Дорочинская В. А., Данилов А. М., Тонконогов Б. П. Присадки к топливам и смазочным материалам : учебное пособие. М. : Рос. гос. ун-т нефти и газа имени И. М. Губкина, 2017. 290 с.
2. Маслова И. П., Золотарева К. А., Глазунова Н. А. Химические добавки к полимерам : справочник. М. : Химия, 1973. 271 с.

3. Synthesis and Reduction of N-Substituted 5-Nitrosoquinolin-8-amines. / N. A. Gavrilova, E. S Semichenko, A. A. Kondrasenko, G.A. Suboch // Russ. J. Org. Chem. 2016. Vol. 52, № 3. P. 368–372.

4. Jensen K. A., Nielsen P. H. Chelates Derived from N,N'-Bis-(8-quinolyl)-ethylenediamine and Analogous Compounds // Acta Chemica Scandinavica. 1964. Vol. 18. P. 1–10.

5. Dahl O., Nielsen P. H. Ionic Nickel (II) and Cooper (II) Chelates with 8-Aminoquinoline and some of its Derivatives // Acta Chemica Scandinavica. 1966. Vol. 20. P. 1113–1121.

#### References

1. Dorochinskaya V. A., Danilov A. M., Tonkonogov B. P. *Prisadki k toplivam i smazochnym materialam* [Additives to fuels and lubricants]. Moscow, Rossiyskiy gosudarstvennyy institute nefti gaza imeni I. M. Gubkina, 2017. 290 p.
2. Maslova I. P., Zolotareva K. A., Glazunova N. A. *Himicheskie dobavki k polimeram* [Chemical additives to polymers]. Moscow, Himiya Publ., 1973. 271 p.
3. Synthesis and Reduction of N-Substituted 5-Nitrosoquinolin-8-amines. / N. A. Gavrilova, E. S Semichenko, A. A. Kondrasenko, G. A. Suboch // Russ. J. Org. Chem. 2016. Vol. 52, № 3. P. 368–372.
4. Jensen K. A., Nielsen P. H. Chelates Derived from N,N'-Bis-(8-quinolyl)-ethylenediamine and Analogous Compounds // Acta Chemica Scandinavica. 1964. Vol. 18. P. 1–10.
5. Dahl O., Nielsen P. H. Ionic Nickel (II) and Cooper (II) Chelates with 8-Aminoquinoline and some of its Derivatives // Acta Chemica Scandinavica. 1966. Vol. 20. P. 1113–1121.

© Курочкина Е. Ю., Селина С. Н., Гаврилова Н. А., Субоч Г. А., 2019

УДК 547.773

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ АЗОСОЕДИНЕНИЙ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ 4-АМИНО-3-МЕТОКСИМЕТИЛ-5-(4-БРОМФЕНИЛ)-1Н-ПИРАЗОЛА

Д. И. Персидская, А. А. Кукушкин, Е. В. Роот

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

4-Аминопиразол с метоксиметильным и *p*-бромфенильным заместителями был получен восстановлением соответствующего азопиразола. Доказательство строения полученного встречным синтезом соединения подтверждено на основании ЯМР – спектроскопии и ВЭЖХ – спектрометрии. Известно, что аналогичные пиразолы успешно используются в качестве химического ракетного топлива.

Ключевые слова: встречный синтез, аминопиразол, азосочетание, конденсация Кляйзена.

## RESTORATION OF AZO COMPOUNDS AS AN ALTERNATIVE METHOD FOR PRODUCING 4-AMINO-3-METHOXYMETHYL-5-(4-BROMPHENYL)-1H-PYRAZOL

D. I. Persidskaya, A. A. Kukushkin, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: percedes@mail.ru

4-Aminopyrazole with methoxymethyl and *p*-bromophenyl substituents was obtained by reduction of the corresponding azopyrazole. The proof of the structure of the compound obtained by counter synthesis was confirmed on the basis of NMR spectroscopy and HPLC spectrometry. It is known that similar pyrazoles are successfully used as chemical rocket fuel.

Keywords: counter synthesis, aminopyrazole, azo coupling, Claisen condensation.

Ранее на кафедре ОХТ нами был синтезирован аминопиразол (1) с *p*-бромфенильным заместителем по схеме, представленной на рис. 1.

Синтез аминопиразола (1) осуществлялся в несколько стадий с общим суммарным выходом 1,5 % на исходный ацетофенон [1]. Учитывая расход растворителей, реагентов и выход целевого продукта, такой метод получения данного соединения является малоэффективным.

Одним из способов снятия этих противоречий является применение азосоединений, для получения 4-аминопиразолов. Использование арилазопроизводных вместо нитрогруппы для синтеза аминопиразолов выгоднее, так как это помогает снизить расход реагентов. Арилазогруппа восстанавливается до аминосоединений в более мягких условиях и не оказывает канцерогенное действие в отличие от нитрозопроизводных [2].

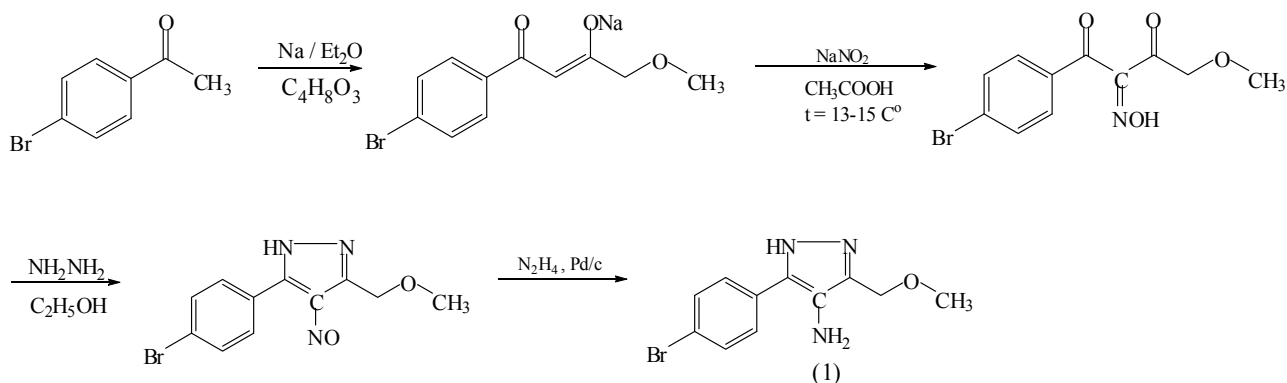


Рис. 1. Получение аминопиразола через нитрозо бета-дикарбонильные соединения

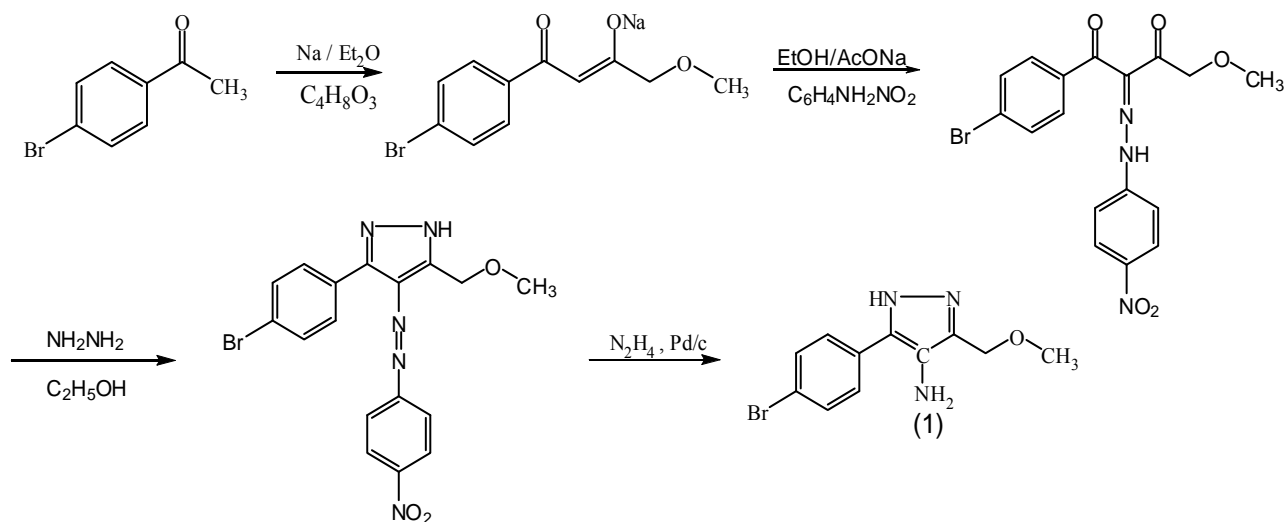


Рис. 2. Схема получения аминопиразола через азотфункционализованные бета-дикарбонильные соединения

Поэтому целью данной работы является синтез 4-амино-3-метоксиметил-5-(4-бромфенил)-1H-пиразола через арилазофункционализованные бета-дикарбонильные соединения.

Синтез осуществляли по схеме, представленной на рис. 2.

Диазотирование *n*-нитроанилина проводили нитритом натрия в избытке соляной кислоты на холоду. Азосочетание *p*-нитрофенилдиазоний хлорида с бета-дикарбонильным соединением осуществляли в ацетатном буферном растворе не превышая разогрева выше 5 °С. Через 0,5 часа реакционную массу втрое разбавляли ледяной водой, выпадали кристаллы желтого цвета которые отфильтровывали. Полученный осадок перекристаллизовывали из спирта [3].

Циклоконденсацию 4-метокси-1-(*n*-бромфенил)-2-(*n*-нитрофенилгидразо)-1,2,3-бутантрион с гидразингидратом осуществляли в этиловом спирте, не допуская нагрева выше 25 °С.

Реакционную массу перемешивали в течение 6-ти часов. Затем осадок отфильтровывали и перекристаллизовывали из спирта [4].

Восстановление 4-азопиразола проводили 2-х кратным избытком гидразингидратом на палладиевом катализаторе в этиловом спирте.

Смесь перемешивали в течение 2-х часов, затем отфильтровывали от угля. Маточник упаривали в выпарной чашке. Образовавшиеся кристаллы светло-коричневого цвета, перекристаллизовывали из спирта [5]. Строение полученного аминопиразола (1) подтверждалось с помощью ЯМР – спектроскопии ВЭЖХ/МС-спектрометрии и полностью соответствовало аминопиразолу полученному по известному методу. Суммарный выход стадиям данного метода составил 5.0 %, что в 3.2 раз больше, чем у известного.

Таким образом, учитывая расход растворителей и реагентов, и суммарный выход синтеза, получение 4-амино-3-метоксиметил-5-(4-бромфенил)-1H-

пиразола через азотфункционализованные бета-дикарбонильные соединения является более эффективным.

#### Библиографические ссылки

1. Synthesis and Sulphonylation of 4-Amino-3-Methoxymethyl-5-(4-Chlorophenyl)-1H-Pyrazole / D. I. Persidskaya, I. G. Povarov, V. V. Efimov // Journal of Siberian Federal University. Chemistry 3. 2018. № (11). P. 369–376.
2. Солдатенков А. Т. Основы органической химии лекарственных веществ. М. : Мир, 2003, 19 с.
3. Персидская Д. И., Кукушкин А. А., Роот Е. В. Синтез 3(5)-метокси-5(3)-(*n*-бромфенил)-4-(*n*-нитрофенилгидразо)-1H-пиразола. // Междисциплинарные исследования. Современное состояние и перспективы развития : сб. статей XXXVII Междунар. студенческой научно-практ. конф. Екатеринбург : Изд-во «ИМПРУВ», 2019. 37 с.
4. Синтез 3(5)-(4-хлорфенил)-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1H-пиразола / Д. И. Персидская, А. А. Кукушкин, Е. В. Роот и др. // Междисциплинарные исследования. Современное состояние и перспективы развития : сб. статей XXXVII Междунар. студенческой научно-практ. конф. Екатеринбург : Изд-во «ИМПРУВ», 2019. 37 с.
5. Синтез 4-амино-5-(4-бромфенил)-3-метоксиметил-1H-пиразола / В. В. Ефимов, А. А. Любяшкин, М. С. Товбис и др. // Химическая наука и образование Красноярья : материалы XI межрегион. научно-практ. конф., посвященной 150-летию Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. Красноярск, 2018. 245 с.

#### References

1. Synthesis and Sulphonylation of 4-Amino-3-Methoxymethyl-5-(4-Chlorophenyl)-1H-Pyrazole / D. I. Persidskaya, I. G. Povarov, V. V. Efimov // Journal

of Siberian Federal University. Chemistry 3. 2018. № (11). P. 369–376.

2. Soldatenkov A.T. Osnovy organicheskoy himii lekarstvennyh veshchestv. M.: Mir, 2003, 19 s.

3. Persidskaya D. I., Kukushkin A. A., Root E. V. Sintez 3(5)-metoksi-5(3)-(p-bromfenil)-4-(p-nitrofenilgidrazo)-1N-pirazola // Interdisciplinary research. Current status and development prospects: Sat. Articles XXXVII Int. student scientific and practical. conf. Yekaterinburg : IMPRUV Publishing House, 2019. 37 p.

4. Sintez 3(5)-(4-hlorfenil)-4-amino-5(3)-piridin-4-il-1N-pirazola / D. I. Persidskaya, A. A. Kukushkin, E. V. Root et al. // Interdisciplinary research. Current

status and development prospects: Sat. Articles XXXVII Int. student scientific and practical. conf. Yekaterinburg : IMPRUV Publishing House, 2019. 37 p.

5. Sintez 4-amino-5-(4-bromfenil) -3-metoksimetil -1n-pirazola / V. V. Efimov, A.A. Lyubyashkin, M. S. Tovbis et al. // Himicheskaya nauka i obrazovanie Krasnoyar'ya : materialy XI mezhregional. nauchno-prakticheskoy konf., posvyashchennoj 150-letiyu Rossijskogo himicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva. Krasnoyarsk, 2018. 245 p.

© Персидская Д. И., Кукушкин А. А.,  
Root E. V., 2019

УДК 621.383.51

## ПОДБОР РЕЖИМОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ФОТОРЕЗИСТАХ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Е. П. Слыщенко<sup>1,2</sup>, Н. Т. Вагапова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное предприятие «Квант»  
Российская Федерация, 129626 г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16  
E-mail: otdel\_17@npp-kvant.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4

*Качество контактной структуры трехкаскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) космического назначения напрямую зависит от операции фотолитографии, поэтому основной задачей является правильно подобрать фоторезист.*

*Ключевые слова: трехкаскадный фотопреобразователь, фоторезист, солнечная батарея, полупроводниковые материалы, экспонирование, фоторезистивная маска, омические контакты.*

## SELECTION OF PHOTOLITHOGRAPHY MODES ON DOMESTIC PHOTO RESISTORS IN THE TECHNOLOGY OF SOLAR CELLS PRODUCTION

E. P. Slyshchenko<sup>1,2</sup>, N. T. Vagapova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>JSC „Research and production enterprise “Kvant”  
16, 3rd Mytishchi Str., Moscow, 129626, Russian Federation  
E-mail: otdel\_17@npp-kvant.ru

<sup>2</sup>National University of Science and Technology „MISIS“  
4, Leninsky Av., Moscow, 119049, Russian Federation

*The quality of the contact structure of multi-junction solar cell for space purposes directly depends on the operation of photolithography, therefore, the main task is to choose the photoresist correctly.*

*Keyword: multi-junction solar cell, photoresist, solar battery, semiconductor materials, exposure, photoresist mask, ohmic contacts.*

Электроснабжение большинства космических аппаратов (КА) обеспечивается за счет солнечных батарей (СБ), преобразующих энергию солнца. Энергопотребление бортовой аппаратуры современных КА достигает нескольких десятков киловатт. Эта мощность должна гарантированно вырабатываться фотогенерирующей частью СБ даже спустя годы эксплуатации в условиях открытого космоса. Таким образом, при проектировании СБ КА возникает необходимость делать поправку на деградацию СБ от воздействия факторов космического пространства и закладывать более высокую мощность генераторов. Увеличение генерируемой мощности СБ может быть достигнуто за счет увеличения их площади и применения в фотогенерирующей части наиболее эффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Однако наращивание площади СБ приводит к усложнению их конструкции, что создает сложности при упаковке КА для размещения под обтекателем ракеты-носителя, а также повышает вероятность возникновения нештатных ситуаций при разворачивании СБ в космосе [1].

На сегодняшний день из всех существующих видов ФЭП наиболее эффективными из промышленно выпускаемых являются – трехпереходные (трехкас-

кадные) ФЭП на основе соединений InGaP/InGaAs/Ge. В таких ФЭП за счет использования сложной полупроводниковой эпитаксиальной структуры одновременно идет поглощение трех участков спектра солнечного излучения, что позволяет достигать КПД до 29–30 %, но следует понимать, что достижение такой высокой эффективности преобразования возможно только при высоком совершенстве технологии изготовления ФЭП.

Важнейшими технологическими операциями в многостадийном технологическом цикле изготовления высокоэффективных трехкаскадных ФЭП являются: рост полупроводникового кристалла и создание контактного рисунка на лицевой фотоактивной стороне прибора, – но, если рост контролируется и выполняется высокотехнологичными прецизионными эпитаксиальными реакторами, то создание контактной металлизации обеспечивается преимущественно ручными процессами [2; 3].

Формирование контактов на лицевой стороне ФЭП имеет свои ограничения и преследует цель соблюсти баланс между площадью контакта, достаточной для более полного токосбора и одновременно создающей минимально допустимое затенение фотоактивной области. Надо понимать, что возникающие

при выполнении этой операции дефекты контактной и полупроводниковой структуры ФЭП пагубно отражаются на выходных характеристиках прибора. Именно поэтому процесс создания металлических токосборных контактов на лицевой стороне ФЭП требует особого подхода как с точки зрения высокого профессионализма персонала и точного соблюдения всех технологических параметров процесса, так и с точки зрения качества применяемых материалов.

Последнее требование, является, пожалуй, наиболее существенным в виду того, что проверенные временем, качественные материалы зачастую оказываются импортного производства, что накладывает соответствующие ограничения и риски. Так, например, для формирования сложного рисунка лицевого токосъемного контакта применяются дорогостоящий импортный фоторезист, который в силу химического состава имеет достаточно короткий срок годности и чувствителен к температурному режиму хранения. При этом в силу того химического состава данный фоторезист является токсичным веществом, что накладывает дополнительные временные задержки при его поставке.

Таким образом, зачастую оказывается, что за несколько месяцев, что длилась поставка материала, условия хранения не были соблюдены, – это ведет к неконтролируемому ускорению распада химических компонентов фоторезиста, его преждевременному неконтролируемому старению и потере свойств. На практике работа с таким материалом является труднопрогнозируемой и нетехнологичной, а качество изготавливаемой продукции значительно снижается [3–5].

Для преодоления данной флуктуации на АО «НПП «Квант» в кооперации с другими заинтересованными предприятиями, без остановки основного производства, ведутся расчетно-экспериментальные и технологические работы по подбору отечественных аналогов применяемого импортного фоторезиста и связанная с этим подготовка к глубокой модернизации существующей технологии создания трехкаскадных ФЭП.

Так, уже достигнуты значимые успехи при работе с некоторыми марками отечественных фоторезистов: подобраны близкие к оптимальным толщины нанесения слоя фоторезистивной маски, времена экспонирования, первичного и вторичного задубливания, проявления, найдены несколько альтернативных вариантов смывки фоторезиста. Дополнительно ведутся экспериментальные работы по применению специальных марок фоторезистов отечественного производства для использования в качестве защитных масок при различных химических обработках заготовок ФЭП, присутствующих в технологии.

Достигнутая после продолжительных поисков положительная динамика результатов экспериментальной работы позволяет ожидать в скором времени вы-

пуска первых опытных партий приборов по модернизированному технологическому циклу. В случае, если успехи экспериментальных работ будут достигнуты при выпуске опытных партий приборов и их выходные параметры выдержат проверку по программе испытаний наземной квалификации, то АО «НПП «Квант» будет достигнут значимый успех (экономический эффект) – достигнуты снижение себестоимости производства приборов за счет применения более дешевых фоторезистов и понижение рисков возникновения простоев производства из-за перебоев с поставками импортных материалов.

### Библиографические ссылки

1. Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АПВВ / Е. В. Слыщенко, А. А. Наумова, А. А. Лебедев и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 308–324.
2. Пат. 2 610 843(13) Российская Федерация, <sup>МПК7</sup> H01L 21/027, H01L 21/312, G03F 7/022, H05K 3/06. Способ взрывной фотолитографии / Ламбакшев А. Ф., Котомина В. Е., Зеленцов С. В. и др. № 2015150113 ; заявл. 23.11.2015 ; опубл. 16.02.2017 Бюл. № 5. 2 с.
3. Sze S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology. New York, NY: Wiley, 2002.
4. Ch.-Y. Tseng, Ch.-T. Lee. Improved performance mechanism of III–V compound triple-junction solar cell using hybrid electrode structure // Solar Energy. 2013. Vol. 89. P. 17–22.
5. Капустин В. И. Материаловедение и технологии электроники. М. : StudRed, 2014, 422 с.

### References

1. The review of modern solar cells for space application based on APBV materials / E. V. Slyshchenko, A. A. Naumova, A. A. Lebedev et al. // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 19, № 2. P. 308–324.
2. *Sposob vzryvnoy fotolitografii* [Explosive photolithography method] / Lambakshev A. F., Kotoмина V. E., Zelentsov S. V. et al. Patent RF, № 2 610 843(13), 2015.
3. Sze S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology. New York, NY: Wiley, 2002.
4. Ch.-Y. Tseng, Ch.-T. Lee. Improved performance mechanism of III–V compound triple-junction solar cell using hybrid electrode structure // Solar Energy. 2013. Vol. 89. P. 17–22.
5. Kapustin V. I. *Materialovedenie u texnologii elektroniki* [Materials science and electronics technology]. Moscow, StudRed Publ., 2014, 422 p.

© Слыщенко Е. П., Вагапова Н. Т., 2019

УДК 544.14

## СВЯЗЬ ЯДЕРНОЙ СТРУКТУРЫ СО СВОЙСТВАМИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. А. Снежко, Н. Р. Кашапова, Е. К. Васильева\*, Ю. И. Воробьева, З. Э. Эмилбекова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

*Основной геохимический закон В. М. Гольдшмидта, согласно которому существует прямая связь внутреннего строения атомного ядра с геохимическими свойствами вещества, не имеет количественного описания через соотношение «нуклоны/протоны». Представлены результаты анализа вариационного ряда данных соотношений для различных элементов.*

*Ключевые слова: химические элементы, физико-химические свойства, соотношение «нуклоны/протоны».*

## THE RELATIONSHIP OF THE NUCLEAR STRUCTURE WITH THE PROPERTIES OF CHEMICAL ELEMENTS

A. A. Snezhko, N. R. Kashapova, E. K. Vasil'eva\*, Ju. I. Vorob'eva, Z. Je. Jemilbekova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

*In the Basic geochemical law. M. Goldschmidt, according to which there is a direct link between the internal structure of the atomic nucleus and the geochemical properties of matter, has no quantitative description through the ratio "nucleons/protons". The paper presents the results of the analysis of the variation series of these relations for different elements.*

*Keywords: chemical elements, physico-chemical properties, the ratio "nucleons/protons".*

Периодическая система Д. И. Менделеева отражает зависимость различных свойств химических элементов от заряда их атомного ядра. При увеличении порядкового номера изменяются те или иные свойства. Атомные ядра включают определенное количество нейтронов и протонов.

Параметры и свойства атомных ядер влияют на протекание химических процессов, так как масса, заряд, энергия связи, устойчивость и ядерный спин ядра в значительной мере определяют свойства атома в целом [1]. Основной геохимический закон В. М. Гольдшмидта, согласно которому кларки элементов зависят от строения атомного ядра, а их миграция – от наружных электронов, определяющих химические свойства элементов, говорит о прямой связи внутреннего строения атомного ядра с геохимическими свойствами вещества [2].

Для определения количественной причинно-следственной связи между отношением числа нуклонов в ядре к количеству протонов и свойствами химических элементов была составлена таблица. Элементы в таблице расположены по возрастанию числа соотношения нуклонов к протонам.

На основании табличных данных была построена диаграмма (см. рисунок), анализ которой показал, что для металлов с одинаковым соотношением характерен определенный тип кристаллической решетки (сингонии), а значит, и соответствующие физико-химические свойства элементов [3–5].

Очевидно, кривая включает в себя три горизонтальных плато при соотношениях 2; 2,2; 2,5. Промежуточные участки обнаруживают стохастическое поведение графика, не позволяющее выделить явную связь «соотношение – тип решетки».

Металлы первого наиболее затянутого интервала с двойным соотношением обладают гранцентрированной кубической кристаллической решеткой [4].

Химические элементы с металлическими свойствами, у которых соотношение равно 2,2 также имеют одинаковую кристаллическую решетку – ромбоэдрическую [4]. Исключение составляет группа металлов с соотношением 2,5 – с разнообразным типом решеток.

Интерес вызывает общие признаки остальных участков изучаемой кривой, в связи с чем требуются дополнительные исследования.

## Соотношение нуклонов к протонам в ядрах различных элементов

Элементы	Нуклоны/p	Элементы	Нуклоны/p	Элементы	Нуклоны/p
6 C	2	45 Rh	2,28888889	70 Yb	2,471429
7 N	2	37 Rb	2,2972973	72 Hf	2,472222
8 O	2	47 Ag	2,29787234	73 Ta	2,479452
10 Ne	2	44 Ru	2,29545455	75 Re	2,48
12 Mg	2	46 Pd	2,30434783	106 Sg	2,481132
14 Si	2	38 Sr	2,31578947	74 W	2,486486
16 S	2	34 Se	2,32352941	77 Ir	2,493506
20 Ca	2	3 Li	2,33333333	79 Au	2,493671
19 K	2,05263158	36 Kr	2,33333333	105 Db	2,495238
17 Cl	2,05882353	48 Cd	2,33333333	76 Os	2,5
15 P	2,06666667	49 In	2,34693878	78 Pt	2,5
13 Al	2,07692308	61 Pm	2,37704918	80 Hg	2,5
11 Na	2,09090909	50 Sn	2,38	84 Po	2,5
28 Ni	2,10714286	59 Pr	2,38983051	104 Rf	2,509615
9 F	2,11111111	51 Sb	2,39215686	83 Bi	2,518072
21 Sc	2,14285714	53 I	2,39622642	81 Ti	2,518519
26 Fe	2,15384615	60 Nd	2,4	82 Pb	2,52439
30 Zn	2,16666667	63 Eu	2,41269841	91 Pa	2,538462
24 Cr	2,16666667	58 Ce	2,413793	102 No	2,539216
22 Ti	2,18181818	55 Cs	2,418182	103 Lr	2,543689
27 Co	2,18518519	62 Sm	2,419355	99 Es	2,545455
25 Mn	2,2	54 Xe	2,425926	97 Bk	2,546392
5 B	2,2	57 La	2,438596	93 Np	2,548387
29 Cu	2,20689655	56 Ba	2,446429	89 Ac	2,550562
23 V	2,2173913	65 Tb	2,446154	101 Md	2,554455
18 Ar	2,22222222	107 Bh	2,448598	95 Am	2,557895
4 Be	2,25	69 Tm	2,449275	98 Cf	2,561224
31 Ga	2,25806452	64 Gd	2,453125	87 Fr	2,563218
41 Nb	2,26829268	68 Er	2,455882	88 Ra	2,568182
33 As	2,27272727	52 Te	2,461538	100 Fm	2,57
40 Zr	2,275	67 Ho	2,462687	96 Cm	2,572917
43 Tc	2,27906977	108 Hs	2,462963	90 Th	2,577778
32 Ge	2,28125	71 Lu	2,464789	86 Rn	2,581395
39 Y	2,28205128	109 Mt	2,46789	92 U	2,586957
35 Br	2,28571429	66 Dy	2,469697	94 Pu	2,595745
42 Mo	2,28571429	85 At	2,470588		

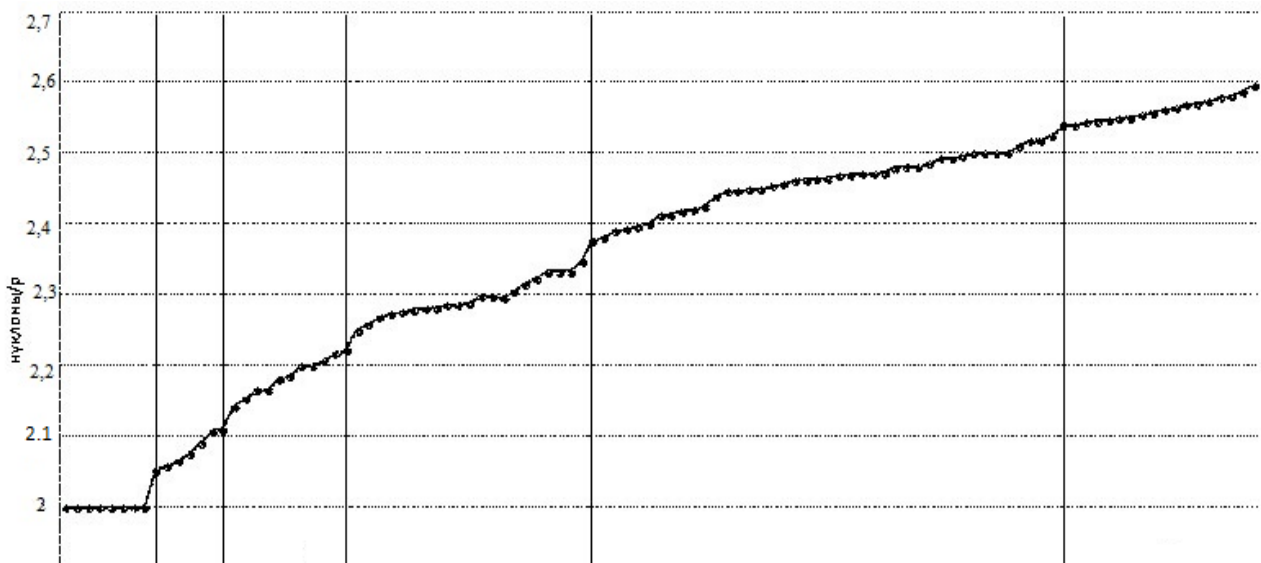


Диаграмма зависимости отношения нуклонов к протонам



**Библиографические ссылки**

1. Связь структуры и свойств химических веществ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chem21.info/info/1661703> (дата обращения: 03.09.2019).
2. Родыгина, В. Г. Курс геохимии : учебник для вузов. Томск : Изд-во НТЛ, 2006. 228 с.
3. Таблица Менделеева [Электронный ресурс] / URL: <https://table-mendelev.ru> (дата обращения: 03.09.2019)
4. Картонова Л. В. Основы кристаллографии : учеб. пособие / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Владимир, 2015. 80с.
5. Мальцева Л. А., Гервасьев М. А., Кутын А. Б. Материаловедение : учеб. пособие. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. 339 с.

**References**

1. Svjaz' struktury i svojstv himicheskikh veshhestv [Electronic resource]. URL: <https://www.chem21.info/info/1661703> (accessed: 03.09.2019).
2. Rodygina, V. G. Kurs geohimii : Uchebnik dlja vuzov. Tomsk : Izd-vo NTL, 2006. 228 p.
3. Tablica Mendeleeva [Electronic resource]. URL: <https://table-mendelev.ru>, (accessed: 03.09.2019).
4. Kartonova L. V. Osnovy kristallografii: ucheb. posobie / Vladim. Gos. Un-t im A. G. i N. G. Stoletovyh. Vladimir, 2015. 80 p.
5. Mal'ceva L. A., Gervas'ev M. A., Kut'in A. B. Materialovedenie: uchebnoe posobie. Ekaterinburg : UGTU-UPI, 2007. 339 p.

© Снежко А. А., Кашапова Н. Р., Васильев Е. К., Воробьева Ю. И., Эмилбекова З. Э., 2019

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОСТИ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ, БОРА, БОРИДОВ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА\*

И. В. Сорокин<sup>1</sup>, А. Г. Коротких<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина 36  
E-mail: ivans3485@gmail.com

*Представлены результаты экспериментального исследования химической активности порошков на основе алюминия, бора, алюминия и титана, которые могут быть использованы в составе топлив различных энерго-силовых установок и газогенераторов, выпускаемых ракетно-космической промышленностью. Благодаря высокой выделяемой энергии при окислении и горении, борсодержащие композиции являются одними из наиболее перспективных горючих компонентов для применения в гибридном или твердом ракетном топливах.*

*Ключевые слова: аморфный бор, алюминий, титан, степень превращения, температура окисления, скорость окисления.*

## THE STUDY OF THE ACTIVITY PARAMETERS OF METAL POWDERS ALUMINUM, BORON, BORIDES OF ALUMINUM AND TITANIUM

I. V. Sorokin<sup>1</sup>, A. G. Korotkikh<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University  
36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: ivans3485@gmail.com

*This study investigates the metal powders activity based on aluminum, boron and titanium, which can be used in the composition of fuels for various gas generators and power plants. Due to the high energy released during oxidation and combustion, boron-containing compositions are one of the most promising combustible components for use in hybrid and solid rocket fuels.*

*Keywords: amorphous boron; aluminum; titanium; conversion coefficient; oxidation temperature.*

**Введение.** Порошки бора, механосмеси или сплав бор/металл являются одними из наиболее перспективных компонентов для твердого и гибридного ракетного топлива за счет их высокой удельной энергии при окислении в процессе его горения. Среди обычных твердых и жидких топлив для аэрокосмической промышленности бор имеет наибольшую объемную теплотворную способность ( $137,7 \text{ кДж/см}^3$ ) [1; 2].

Бор с трудом подвергается воспламенению и полному сгоранию, в камере сгорания горит неоднородно из-за большой потребности в кислороде и высокой температуры плавления и кипения [1; 3]. Кроме того, его применение значительно усложняется тем, что на поверхности горения частиц бора образуется инертный оксидный слой  $\text{B}_2\text{O}_3$ , который имеет достаточно низкую температуру плавления ( $450 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и высокую температуру кипения ( $1860 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [1–5].

В представленной работе приведены результаты исследования активности порошков металлов на основе алюминия, бора и титана, которые могут быть использованы в гибридных и смесевых твердых топливах в качестве добавок для различных газогенераторов и энергосиловых установок.

**1. Исследуемые образцы.** В сравнительном исследовании параметров химической активности порошков использовались: штатный микроразмерный порошок алюминия Al со среднемассовым диаметром частиц  $d_{43} = 10,8 \text{ мкм}$ , ультрадисперсный порошок (УДП) алюминия марки Alex ( $d_{43} = 0,18 \text{ мкм}$ ), полученный методом электрического взрыва проводников, порошок аморфного бора B ( $d_{43} = 2,0 \text{ мкм}$ ), а также сплавы диборида алюминия  $\text{AlB}_2$  ( $d_{43} = 6,2 \text{ мкм}$ ), додекаборида алюминия  $\text{AlB}_{12}$  ( $d_{43} = 2,3 \text{ мкм}$ ) и диборида титана  $\text{TiB}_2$  ( $d_{43} = 54,5 \text{ мкм}$ ), полученные СВС методом в инертной среде с последующим помолом.

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90015.

Таблица 1

## Температуры окисления и изменение массы порошков металла и бора

Образец	T <sub>on</sub> , °C	T <sub>int</sub> , °C	Увеличение массы Δm, %		
			400–660 °C	660–1200 °C	400–1200 °C
Al	652	660	0.4	8.3	8.7
Alex	570	604	29.5	41.5	71.0
B	559	708	47.8	101.0	148.7
AlB <sub>2</sub>	877	965	1.3	106.6	107.9
AlB <sub>12</sub>	747	826	0.6	118.3	118.9
TiB <sub>2</sub>	482	757	3.0	45.1	48.1

Таблица 2

## Степень превращения и скорость окисления порошков металла и бора

Образец	Степень превращения α, %			Максимальная скорость окисления v <sub>ox</sub> , мг/с (в диапазоне температур, °C)
	400–660 °C	660–1200 °C	400–1200 °C	
Al	0.5	9.5	9.9	0.00045 (978–1017)
Alex	39.0	54.9	93.9	0.0014 (589–617)
B	21.7	46.0	67.7	0.0089 (650–748)
AlB <sub>2</sub> , (Al/B)	0.8/0.3	66.5/21.4	67.3/21.6	0.0051 (1006–1077)
AlB <sub>12</sub> , (Al/B)	0.1/0.2	22.9/44.1	23.0/44.3	0.010 (777–870)
TiB <sub>2</sub>	–	–	–	0.0012 (734–787)

**2. Результаты и обсуждение.** Исследование процесса окисления навесок порошков металлов и бора массой ~10 мг осуществлялось с использованием совмещенного термоанализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в керамических и термоустойчивых тиглях, которые помещались в нагревательную печь. Измерение основных параметров ТГ и ДСК анализов осуществлялось в воздухе при постоянной скорости нагрева печи 10 °C/мин.

В результате проведенных измерений получены данные ТГ и ДСК анализов, которые затем обрабатывались и рассчитывались значения температур начала T<sub>on</sub> и интенсивного T<sub>int</sub> окисления, изменения массы Δm, степень превращения α и скорость окисления v<sub>ox</sub> исследуемых образцов. Расчетные значения параметров химической активности исследуемых порошков металлов представлены в табл. 1 и 2.

Анализ полученных данных показал, что микро-размерный порошок алюминия Al обладает меньшей степенью превращения и скоростью окисления по сравнению с УДП Alex в диапазоне температур 400–1200 °C за счет меньшей толщины оксидного слоя и размера частиц. Максимальные значения скорости окисления имеют образцы с додекаборидом алюминия AlB<sub>12</sub> (0.01 мг/с) и аморфным бором (0.009 мг/с) в диапазонах температур 777–870 и 650–748 °C, соответственно. При увеличении массовой доли алюминия в сплаве Al/B скорость его окисления снижается и переходит в область более высоких температур.

**Заключение.** В результате проведенного исследования химической активности порошков алюминия, бора и титана при нагреве в воздухе установлено, что значения температур интенсивного окисления для исследуемых порошков металлов и бора могут варьироваться от 605 до 965 °C в зависимости от размеров частиц (для алюминия) и компонентного содержания металлов (для сплавов). Максимальной скоростью окисления обладает порошок додекаборида алюминия AlB<sub>12</sub> (0.01 мг/с) в диапазоне температур 777–870 °C, который в следующем этапе исследования будет изучен в составе смесевых композиций на основе твердого окислителя и полимерного горючего.

## Библиографические ссылки

- Liang D., Liu J., Zhou Y., Zhou J. Ignition and combustion characteristics of amorphous boron and coated boron particles in oxygen jet. *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 185. P. 292–300.
- Ao W., Yang W., Wang Y., Zhou J., Liu J., Cen K. Ignition and combustion of boron particles at one to ten standard atmosphere. *Journal of Propulsion and Power*, 2014. Vol. 30, № 3. P. 760–764.
- Liang D., Liu J., Chen B., Zhou J., Cen K. Improvement in energy release properties of boron-based propellant by oxidant coating. *Thermochimica Acta*. 2016. Vol. 638. P. 58–68.
- Hashim S. A., Karmakar Sr., Roy A. Effects of Ti and Mg particles on combustion characteristics of boron-HTPB-based solid fuels for hybrid gas generator

in ducted rocket applications. *Acta Astronautica*, 2019. Vol. 160. P. 125–137.

5. DeLuca L. T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion. *Defence Technology*, 2018. Vol. 14. P. 357–365.

#### References

1. Liang D., Liu J., Zhou Y., Zhou J. Ignition and combustion characteristics of amorphous boron and coated boron particles in oxygen jet. *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 185. P. 292–300.

2. Ao W., Yang W., Wang Y., Zhou J., Liu J., Cen K. Ignition and combustion of boron particles at one to ten standard atmosphere. *Journal of Propulsion and Power*, 2014. Vol. 30, № 3. P. 760–764.

3. Liang D., Liu J., Chen B., Zhou J., Cen K. Improvement in energy release properties of boron-based propellant by oxidant coating. *Thermochimica Acta*. 2016. Vol. 638. P. 58–68.

4. Hashim S. A., Karmakar Sr., Roy A. Effects of Ti and Mg particles on combustion characteristics of boron–HTPB-based solid fuels for hybrid gas generator in ducted rocket applications. *Acta Astronautica*, 2019. Vol. 160. P. 125–137.

5. DeLuca L. T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion. *Defence Technology*, 2018. Vol. 14. P. 357–365.

© Сорокин И. В., Коротких А. Г., 2019

УДК 547.545+547.533

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ 5-НИТРОЗО-8-ХИНОЛИНОЛА С ТЕТРАМЕТИЛЕНДИАМИНОМ**

А. В. Усольцева, Н. А. Гаврилова, Г. А. Субоч

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

*Взаимодействием 5-нитрозо-8-хинолинола с тетраметилендиамином синтезирована ранее неизвестная тетраметилендиаммониевая соль 5-нитрозо-8-хинолинола, и доказано её строение с помощью различных методов спектрального анализа.*

*Ключевые слова:* нитрозогидроксихинолин, тетраметилендиамин, динитрозосоединения, алкандиаммониевая соль.

**INTERACTION OF 5-NITROSO-8-QUINOLINOL WITH TETRAMETHYLENEDIAMINE**

A. V. Usoltseva, N. A. Gavrilova, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: nataliagavrilova@yandex.ru

*In this article, we investigated the interaction of 5-nitroso-8-quinolinol with tetramethylenediamine and proved the structure of the obtained product by various methods of spectral analysis.*

*Keywords:* nitrosohydroxyquinoline, tetramethylenediamine, dinitrosocompounds, alkane-diammonium salt.

С-динитрозосоединения, например, п-динитро-зобензол [1] или N,N'-бис(п-нитрозофенил)этан-диамин [2], являются активными вулканизирующими агентами для этиленпропиленового каучука, бутилкаучука и других эластомеров. В тоже время, диаминосоединения в полимерных композициях используются в качестве модификаторов, противостарителей и антиоксидантов [3]. Особое значение в производстве резинометаллических изделий имеют модификаторы полимерных композиций, способные к комплексообразованию с металлами. В работах [4; 5] показано, что комплексообразующими свойствами обладают N,N'-бис(хинолин-8-ил)алкандиамины.

Ранее нами был синтезирован N,N'-бис(5-нитрозохинолин-8-ил)-гексан-1,6-диамин аминированием 5-нитрозо-8-хинолинола гексаметилендиамином в пиридине при температуре 20 °С [6]. С целью расширения ряда подобных соединений, в данной работе было исследовано взаимодействие 5-нитрозо-8-хинолинола с тетраметилендиамином (1b) (рис. 1).

Опираясь на опыт предыдущей работы [6] реакцию 5-нитрозо-8-хинолинола с тетраметилендиамином, при соотношении 2:1, проводили в пиридине при 20 °С (рис. 1). Реакционную смесь на протяжении 3-4 дней выдерживали при комнатной температуре, после чего образовавшийся осадок отфильтровали.

В отличие от полученного нами ранее N,N'-бис(5-нитрозохинолин-8-ил)-гексан-1,6-диамина и исходного 5-нитрозо-8-хинолинола выделенный продукт хорошо растворялся в воде, а при подкислении водного раствора полученных соединений выделялся исходный 5-нитрозо-8-хинолинол, что определили с помощью ТСХ. Поэтому мы предположили, что полученное соединение представляет собой тетраметиленди-

аммониевую соль 5-нитрозо-8-хинолинола (2a) (рис. 1). Для подтверждения данной гипотезы мы синтезировали калиевую соль 5-нитрозо-8-хинолинола (2b) и сравнили её спектральные характеристики с данными полученного соединения 2a (рис. 2).

В электронных спектрах соединений 2a, b максимумы поглощения п,π\*-перехода ароматической NO-группы наблюдаются в области 625–639 нм (ДМСО), тогда как максимум поглощения продуктов аминирования находится в области 690 нм.

В спектрах ЯМР <sup>13</sup>C (ДМСО-d<sub>6</sub>) соединений 2a, b наблюдаются сигналы в области 182.8 м. д., характерные для карбонильного атома углерода. Следовательно, оба соединения в растворе ДМСО-d<sub>6</sub> преимущественно находятся в хиноноксимной форме (рис. 3).

В спектре ЯМР <sup>1</sup>H (ДМСО-d<sub>6</sub>) соединений 2a и 2b наблюдается двойной набор сигналов хинолинового фрагмента в области 6.17–9.84 м. д., что подтверждает присутствие двух таутомерных форм. В спектре соединения 2a наблюдаются сигналы протонов α-CH<sub>2</sub>-групп, связанных с аммонийным азотом, в области 2.71 м. д.

Сигналы протонов β-CH<sub>2</sub>-групп, не связанных с аммонийным азотом, дают сигналы в области 1.53 м. д. Соотношение сумм интегральных интенсивностей протонов хинолинового фрагмента и метиленовых протонов для соединения 2a равно 5:4, что соответствует мостиковой структуре тетраметилендиаммониевой соли 5-нитрозо-8-хинолинола (2a). Таким образом, нами установлено, что при взаимодействии двукратного избытка 5-нитрозо-8-хинолинола с тетраметилендиамином в пиридине при температуре 20 °С образуется тетраметилендиаммониевая соль 5-нитрозо-8-хинолинола.

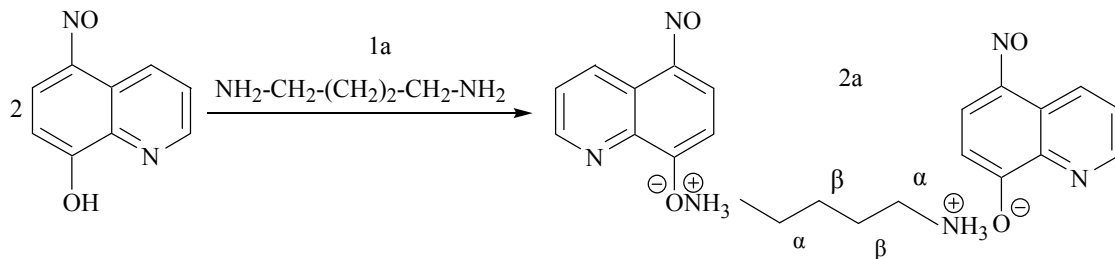


Рис. 1. Синтез тетраметилендиаммониевой соли 5-NO-8-хинолинола (2a)

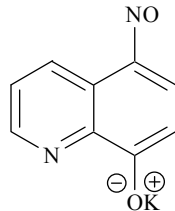


Рис. 2. Калиевая соль 5-нитрозо-8-хинолинола (2b)

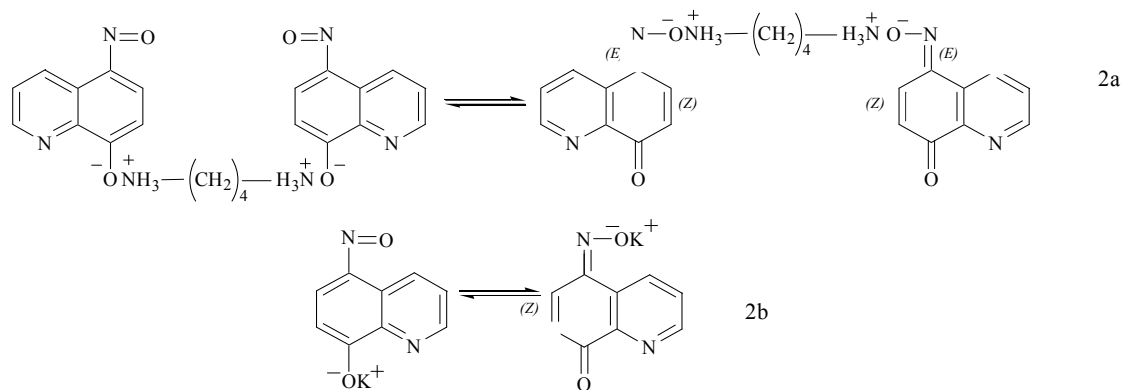


Рис. 3. Таутомерные формы соединения 2a и 5-NO-8-хинолинолята калия (2b)

### Библиографические ссылки

1. Донцов А. А. Процессы структурирования эластомеров. М.: Химия, 1978. 287 с.
2. А. с. 9070031 Российская Федерация, МПК С 08 L 11/00. Резиновая смесь на основе хлоропренового каучука / Черенюк И. П., Беляев Е. Ю., Товбис М. С., Шпиндель Я. И. № 2937943/23-05; заявл. 08.05.80; опубл. 23.02.82, Бюл. № 7.
3. Химические добавки к полимерам: справочник / сост.: И. П. Маслова, К. А. Золотарева, Н. А. Глазунова. М.: Химия, 1973. 271 с.
4. Jensen K. A., Nielsen P. H. Chelates Derived from N,N'-Bis-(8-quinolyl)-ethylenediamine and Analogous Compounds // Acta Chemica Scandinavica. 1964. Vol. 18. P. 1–10.
5. Dahl O., Nielsen P. H. Ionic Nickel (II) and Cooper (II) Chelates with 8-Aminoquinoline and some of its Derivatives // Acta Chemica Scandinavica. 1966. Vol. 20. P. 1113–1121.
6. Синтез и восстановление N-замещенных 5-нитрозохинолин-8-аминов / Н. А. Гаврилова, Е. С. Семиченко, А. А., Г. А. Субоч // ЖОрХ. 2016. Т. 52, № 3. С. 389–393.

### References

1. Dontsov A. A. *Protsessy struktirovaniya elastomero*v [Elastomer Structuring Processes]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 287 p.
2. Cherenyuk I. P., Belyaev E. Yu., Tovbis M. S., Shpindel' Ya. I. *Rezinovaya smes' na osnove khloroprenovogo kauchuka* [A rubber mixture based on chloroprene rubber]. Patent RF, № 9070031, 1980.
3. Maslova I. P., Zolotareva K. A., Glazunova N. A. *Khimicheskie dobavki k polimeram* [Chemical additives to polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 271 p.
4. Jensen K. A., Nielsen P. H. Chelates Derived from N,N'-Bis-(8-quinolyl)-ethylenediamine and Analogous Compounds // Acta Chemica Scandinavica. 1964. Vol. 18. P. 1–10.
5. Dahl O., Nielsen P. H. Ionic Nickel (II) and Cooper (II) Chelates with 8-Aminoquinoline and some of its Derivatives // Acta Chemica Scandinavica. 1966. Vol. 20. P. 1113–1121.
6. Gavrilova. N. A., Semichenko E. S, Kondrasenko A. A., Suboch G. A. [Synthesis and Reduction of N-Substituted 5-Nitrosoquinolin-8-amines]. *Zhurnal Org. Khimii*. 2016. Vol. 52. P. 389–393 (In Russ.).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция

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

<b>Агаев Р. Н., Осипов Д. А., Стояновский С. Р., Ганжин А. Г., Беляцкий М. С.</b> Проектирование стратегического беспилотного летательного аппарата .....	6
<b>Алешина А. С., Замятин Д. А., Кольга В. В.</b> Проектирование системы спасения полезного груза .....	9
<b>Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г., Харлашина С. В.</b> Современные алгоритмы расчета схем полета межпланетных летательных аппаратов .....	12
<b>Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г., Харлашина С. В.</b> Формирование малозатратных схем полета в пределах Солнечной системы .....	14
<b>Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г., Харлашина С. В.</b> Проблемы и перспективы проектирования систем навигации и ориентации беспилотных летательных аппаратов .....	16
<b>Власенко А. В., Рожков И. П., Клешина И. А.</b> Топологическая оптимизация в конструкциях летательных аппаратов .....	18
<b>Гордиенко Е. С., Симонов А. В., Худорожков П. А.</b> Проектирование миссий полета на Луну для доставки лунного грунта .....	20
<b>Дремухин М. А., Мишин С. В., Савельев Р. А., Гоголаев Д. В.</b> Изготовление рефлектора из полимерных композиционных материалов .....	22
<b>Ермаков Д. В.</b> Демпфер системы виброзащиты двигателя-маховика космического аппарата .....	24
<b>Замятин Д. А., Кольга В. В.</b> Построение анизотридной силовой конструкции адаптера космического аппарата .....	26
<b>Карманова А. В., Мишин С. В., Савельев Р. А., Гоголаев Д. В.</b> Трехточечный кран гибкой подвески для перемещения космических аппаратов .....	28
<b>Ключников А. В.</b> Алгоритм одноплоскостной балансировки летающей модели конической формы с оптимизацией по критерию достижения минимального отклонения ГЦОИ .....	30
<b>Леонгард А. П., Казанцев З. А.</b> Разработка концепции космического аппарата для группового пуска .....	33
<b>Леонов С. Н., Семкин П. В., Кудряшов А. С., Бессмертная Ю. С., Внуков А. А.</b> Анализ возможности использования космических аппаратов-ретрансляторов в точках либрации системы Земля–Луна .....	35
<b>Луконин Н. В.</b> Групповой поверхностный монтаж электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов .....	37
<b>Лыкум А. И., Марчук М. Е., Наденин И. О., Кольга В. В.</b> Многоразовая одноступенчатая ракета-носитель .....	40
<b>Марчук М. Е., Наденин И. О., Кольга В. В., Быков А. В., Лыкум А. И.</b> Возвращаемая ступень .....	42
<b>Михина И. С., Шендалев Д. О., Журавлев В. Ю., Бабкина Л. А., Калинин Я. Е.</b> Конечно-элементное моделирование тонкостенной оболочки в зонах большой кривизны в программном комплексе MSC NASTRAN .....	44
<b>Мустафинов К. Е., Анаров М. Ж., Конопля П. А., Майер М. М., Айдос К., Шахматов Е. Н.</b> Оптимальная конструкция обтекателя бокового блока РКН .....	47
<b>Наденин И. О., Кольга В. В., Быков А. В., Марчук М. Е., Лыкум А. И.</b> Концепция воздушного старта ракеты-носителя .....	50
<b>Орлов С. А., Копытов В. И., Матвеев К. А.</b> О некоторых проблемах, возникающих при испытаниях крупногабаритных конструкций космических аппаратов на ударные воздействия высокой интенсивности .....	52
<b>Савенков А. А., Щербакова А. В., Рублевская Е. В.</b> Сравнение припоев и флюсов для рационального режима пайки медной сетки .....	54
<b>Стукалов А. А.</b> Проектирование элементов конструкций в машиностроительном производстве с использованием генеративного дизайна .....	56
<b>Терехина В. С., Фищенко А. В., Рудич А. И., Лисин В. А.</b> Разработка механического участка с ЧПУ для изготовления сборочных единиц наземной антенны .....	58
<b>Тимофеев В. В., Нестеров В. А.</b> Деформирование композитной параболической антенны при локальном термическом нагружении .....	60
<b>Хафизов Д. Е., Казанцев В. В., Леонов А. П., Ефремов С. В.</b> Экспериментальное определение электрических параметров элементов БКС космического аппарата при воздействии внешних факторов .....	63

## Секция

## «КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ КА»

<b>Исеева О. А.</b> Перспективы применения полимеров с памятью формы в космической индустрии .....	67
<b>Исеева О. А.</b> Сравнительный анализ основных силовых элементов конструкции современных негерметичных спутников .....	70
<b>Леоненков А. Д., Оберемок Ю. А., Виноградов К. Н.</b> Перспективы применения конструкций, изготовленных методом 3D-печати из металлических сплавов в рамках космического телескопа «Миллиметрон» .....	72
<b>Азин А. В., Кузнецов С. А., Пономарев С. В., Рикконен С. В.</b> Моделирование режимов работы линейных пьезоэлектрических двигателей .....	74
<b>Ананьев В. В., Голованова В. В., Ермолаев В. А.</b> Заглубленные сезонные термостабилизаторы грунта .....	76
<b>Бацаев С. С., Лайзан В. В., Цытыркин Н. Г.</b> Методика изготовления сотовых панелей из полимерного композиционного материала .....	78
<b>Бельков А. В., Белов С. В., Жуков А. П., Пономарев С. В., Шендалев Д. О.</b> Разработка численных методов проектных расчетов космических аппаратов с крупногабаритными трансформируемыми рефлекторами .....	80
<b>Бернс В. А., Красноруцкий Д. А., Лакиза П. А., Маринин Д. А., Жуков Е. П.</b> Расчетно-экспериментальный метод модального анализа крупногабаритных трансформируемых конструкций .....	82
<b>Братышева В. Е., Орлов Д. В., Пестов А. Б.</b> Метод оптимизации геометрии зеркальных антенн с диаграммой направленности специального вида .....	84
<b>Величко А. И., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В.</b> Оптимизация механизма раскрытия ободного космического рефлектора .....	86
<b>Викторов А. И., Шоркин В. С.</b> Применение антидиффузионного слоя в подвижных механизмах космической техники .....	88
<b>Гончаров К., Панин Ю., Хмельницкий А.</b> Создание сотовых панелей и радиаторов из сверхтеплопроводного углепластика .....	91
<b>Евдокимов А. С., Шендалев Д. О., Валишевская М. Г., Валишевский О. К.</b> Постановка задачи выбора схемы армирования прецизионной штанги крупногабаритного рефлектора .....	93
<b>Евстигнеева Е. И., Коноплев Ю. В., Юев А. А., Сандул Д. А., Толмачев А. С.</b> Разработка системы привода точки актуации беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых конструкций .....	95
<b>Ефремов С. В., Карпов Н. А., Леонов А. П.</b> Выбор материалов для создания бортовой кабельной сети космических аппаратов, функционирующих в условиях криогенных температур .....	97
<b>Завьялов П. С., Жимулева Е. С.</b> Контроль и адаптация зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» методом ножа Фуко .....	99
<b>Зарубин В. С., Зимин В. Н., Колосков И. М., Павлов Н. Г., Филиппов В. С.</b> Экспериментальные исследования привода из материала с эффектом памяти формы для раскрытия трансформируемых космических конструкций .....	102
<b>Зоммер С. А., Иванов А. В., Кравчуновский А. П., Орлин П. А.</b> Разработка механического устройства батареи солнечной для высокоэнергетических платформ космических аппаратов .....	104
<b>Иванов А. В., Тимофеев А. Н., Зоммер С. А.</b> Разработка системы укладки тепловых экранов космического телескопа «Миллиметрон» .....	107
<b>Иванов Е. А.</b> Напряженное состояние клеевого шва П-образного фитинга .....	109
<b>Кожевникова Л. А.</b> Крупногабаритная антенна S-диапазона для спутника связи .....	112
<b>Копылов К. В., Овчинников А. Н., Ворончихин В. Д., Шалыгина Т. А., Воронина С. Ю.</b> Сравнительный анализ углеродных тканей конструкционного назначения .....	114
<b>Кочин Л. Б., Матвеев С. А., Тишков А. И., Ширшов А. Д., Яковенко Н. Г.</b> Разработка беспроводной системы управления формой крупногабаритных трансформируемых конструкций .....	117
<b>Кошелев П. Е., Ширшов А. Д., Толмачев А. С., Евстигнеева Е. И., Коноплев Ю. В.</b> Система передачи энергии и информации по открытому оптическому каналу для управления формой космической антенны .....	119
<b>Кравчуновский А. П., Зоммер С. А.</b> Численное исследование микровибрации на основе конечно-элементной модели космического аппарата .....	121



<b>Лайзан В. В., Тайгин В. Б., Бацаев С. С.</b> Методика регулировки профиля рефлектора из полимерного композиционного материала в процессе его изготовления .....	124
<b>Лихачев А. Н.</b> Исследование деформирования реконфигурируемой конструкции на основе ауксетичной композиционной структуры с управляемым коэффициентом Пуассона .....	126
<b>Лушин И. А., Кравченко И. А.</b> Повышение эффективности КА путем унификации узлов исполнительной автоматики системы коррекции .....	129
<b>Мартынова Е. Ю., Простакишин Р. П., Ошеко П. В.</b> Разработка универсального кантователя для сборки модуля полезной нагрузки (МПН) космических аппаратов тяжелого класса .....	131
<b>Моисеев П. П., Нечушкин И. И.</b> Синусно-косинусный датчик углового положения .....	133
<b>Моисеев П. П., Нечушкин И. И.</b> Спусковой механизм с промежуточным остановом для раскрытия конструкций космического аппарата .....	136
<b>Преснов В. Н., Леоненков А. Д., Оберемок Ю. А., Осипенко Т. С.</b> Топологическая оптимизация элементов конструкции командно-измерительной системы .....	138
<b>Пушница А. С., Ворончихин В. Д., Шалыгина Т. А.</b> Исследование термостабильности этилен-пропиленовых каучуков .....	141
<b>Серяков А. В., Алексеев Анд. П.</b> Исследование коротких тепловых труб методом монотонного нагрева .....	144
<b>Толмачев А. С., Кошелев П. Е., Юев А. А., Сандул Д. А., Земцова П. И.</b> Разработка системы технического зрения для мониторинга и анализа световых сигналов исполнительных устройств крупногабаритных трансформируемых конструкций .....	147
<b>Тюпкин С. С., Батрутдинов Р. Г., Обверткин И. В., Власов А. Ю.</b> Сравнение конструкционных материалов для выбора технологии изготовления крупногабаритных радиопрозрачных изделий .....	149
<b>Халиманович В. И., Бернс В. А., Красноруцкий Д. А., Лушин В. Н., Маринин Д. А.</b> Проблемы экспериментального модального анализа крупногабаритных трансформируемых космических конструкций .....	151
<b>Шалыгина Т. А., Воронина С. Ю., Власов А. Ю., Пасечник К. А., Обверткин И. В.</b> Калориметрические исследования с температурной модуляцией переходного слоя, образовавшегося вследствие диффузионной адгезии эпоксидного аппрета углеродных волокон и полиуретановой матрицы .....	154
<b>Юев А. А., Ширшов А. Д., Евстигнеева Е. И., Кошелев П. Е., Коноплев Ю. В.</b> Разработка беспроводной системы контроля и мониторинга электронных устройств .....	157

## Секция

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

<b>Агаев Р. Н., Агаев Н. З., Осипов Д. А., Коротеев А. В., Ганжин А. Г.</b> Проектирование силовой установки стратегического беспилотного летательного аппарата .....	161
<b>Асташов И. В., Белькевич А. И., Миронов П. А.</b> Методы повышения энергетических параметров ЖРД .....	164
<b>Алексеев К. В., Волосяников А. В., Королев А. С., Нестеров В. Д.</b> Исследование теплоотдачи ламинарных течений в элементах проточных частей турбин .....	166
<b>Баленков Д. С., Соколов Д. А., Дубынин П. А., Толстопятов М. И.</b> Методика проведения испытаний и обработки экспериментальных данных бустерных электронасосных агрегатов .....	168
<b>Бегишев А. М., Журавлев В. Ю.</b> Сравнительный анализ различных градуировочных систем силоизмерительных устройств стендов испытаний ЖРД .....	171
<b>Грачев И. А., Кудашов Е. В., Болотов М. А.</b> Компьютерное моделирование сборки ротора компрессора низкого давления .....	173
<b>Ермаков П. А., Кубриков М. В.</b> Пятиосевая обработка в производстве ракетных двигателей .....	176
<b>Жежера С. А., Неизвестных А. А., Тютюнников Т. В., Фёдоров М. А., Зуев В. О.</b> Программный комплекс расчетов гидродинамических и теплофизических параметров расчета элементов проточных частей энергетических установок .....	178
<b>Жуйков Д. А.</b> Способ выбора законов трения при расчете гидравлических потерь в каналах лопаточных машин ЖРД .....	181

<b>Зуев А. А., Аригольд А. А.</b> Аналитический подход при определении локального коэффициента теплоотдачи в граничных условиях полостей вращения .....	183
<b>Зуев А. А., Аригольд А. А.</b> Дисковое трение при определении баланса мощностей ТНА ЖРД .....	185
<b>Конозобкин Ю. В., Ледков Я. Ю.</b> Способы повышения качества внутренних полостей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя .....	187
<b>Лотарев Д. А., Раткин С. А.</b> Разработка технологии плетения профильных труб из композиционных материалов с участком, содержащим крестовое соединение .....	189
<b>Назаров В. П., Савчин Д. А., Назарова Л. П.</b> Увеличение точности определения кавитационной характеристики шнекоцентробежных насосов .....	191
<b>Назаров В. П., Яцуненко Г. С.</b> Перспективные вопросы стендовых испытаний кослородно-водородных ЖРД .....	193
<b>Неватус И. С., Бузунов В. К., Муравьев П. С.</b> Гидродинамические и тепловые параметры течения в полостях насосов ракетных двигателей .....	195
<b>Печенин В. А., Грачев И. А., Рузанов Н. В., Болотов М. А.</b> Разработка действительных моделей объектов для условий цифрового производства .....	197
<b>Титенков С. В., Журавлев В. Ю.</b> Актуальные проблемы производства 3d-моделей трубопроводов .....	200
<b>Титенков С. В., Журавлев В. Ю.</b> Оптимальная конструкция и функционирование агрегата гибки при производстве трубопроводов сложной конфигурации .....	203
<b>Торгашин А. С., Жуйков Д. А.</b> К постановке задачи моделирования кавитации в турбонасосах ЖРД .....	205
<b>Яковлев А. А., Петецкая А. Е., Волчкова Е. И., Вайкус А. Л.</b> Особенности алгоритма расчета течения с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов .....	207

## Секция

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

<b>Булов А. О., Ермаков М. А.</b> Перспективы развития вакуумных холодильных машин .....	210
<b>Васильев И. М., Дементьев А. А.</b> Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса с учетом контактного термического сопротивления .....	213
<b>Делков А. В., Умников Е. К., Ларин Г. Г., Рудко С. В., Шейдаев Э. Б.</b> Численное моделирование свободной тепловой конвекции при различном расположении источников тепла .....	216
<b>Кишкин А. А., Хахленков А. В., Ермаков М. А., Абдуллаев М. У., Потес Д. В.</b> Моделирование рабочих режимов конвективной жидкостной системы охлаждения .....	218
<b>Ходенков А. А., Ходенкова Э. В.</b> Измерительный комплекс для испытаний теплоэнергетических установок .....	221
<b>Ходенков А. А., Мелкозеров М. Г.</b> Экспериментально-измерительный комплекс для испытаний энергоустановок .....	223
<b>Черненко В. В., Черненко Д. В.</b> Блок гидравлического расчета в математической модели конденсатора-испарителя воздуходелительной установки .....	225
<b>Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Делков А. В., Шилкина М. О.</b> Экспериментальное исследование эффективности работы микротурбинных энергетических установок .....	228
<b>Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Делков А. В., Шилкина М. О.</b> К вопросу численного моделирования паровых микротурбинных установок .....	231

## Секция

**«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»**

<b>Вавилин В. А., Левко В. А., Якубович И. О., Покушко М. С., Кульков А. А.</b> Проектирование и изготовление специального осевого инструмента для изготовления пресс-форм сложной конфигурации .....	234
<b>Васильев Е. Н.</b> Расчет характеристик теплопередачи оребренной стенки теплообменника .....	237
<b>Васильев Е. Н., Деревянко В. А., Корхова М. И.</b> Экспериментальная модель теплового аккумулятора с фазовым переходом .....	239

<b>Володин А. Ю., Савин Д. И., Якубович И. О.</b> Проведение предварительных испытаний осевого режущего инструмента .....	242
<b>Ворожейкин В. А., Литвинчук А. Ю.</b> Исследование влияния вибрации технологической системы на качество обработки вафельного фона изделий РКТ .....	244
<b>Голубовская Н. О., Кретинин С. И.</b> Автоматизация процесса твердого анодирования деталей из алюминиевых сплавов .....	247
<b>Дорофеева Е. С.</b> Испытания специальной фрезы для обработки титановых сплавов .....	249
<b>Зайцева Т. С., Ершов Д. В.</b> Исследование свойств модифицированных фенолформальдегидных смол для связующих композиционных материалов, применяемых в ракетостроении .....	252
<b>Кимм И. Э., Сарапулов К. Б.</b> Емкостное оборудование с применением ракетно-космических технологий .....	254
<b>Красилова Е. В., Пикулин С. А., Гирн А. В.</b> Технология изготовления соединения композитной трубы с металлическим переходником .....	257
<b>Львов В. А.</b> Электронно-лучевая сварка крупногабаритных изделий ракетостроения на современном уровне .....	260
<b>Матчин И. Е.</b> Альфирование титановых сплавов в вакууме .....	262
<b>Окшина О. В., Ворончихин В. Д.</b> Перспективы использования низкомолекулярного полиэфиркетона в качестве технологической добавки для эластомерных композиций .....	264
<b>Пикулин С. А., Красилова Е. В., Гирн А. В.</b> Расчет оптимальных размеров участка металл-композитного соединения .....	266
<b>Преда И. С., Лобастов И. С.</b> Технологическая оптимизация циклов изготовления сферических днищ с вафельным фоном .....	269
<b>Савин Д. И., Якубович И. О.</b> Особенности обработки деталей из молибденовых сплавов .....	271
<b>Самошкин В. М.</b> Особенности оперативного контроля стабильности параметров изделий ракетно-космической техники .....	274
<b>Самошкина П. Ю.</b> Особенности проведения испытаний элементов магистралей трубопроводов .....	277
<b>Свердюк В. В., Ворончихин В. Д., Трушкина Т. В.</b> Исследование бутадиен-нитрильных каучуков в качестве полимерной основы токопроводящих клеевых композиций .....	279
<b>Трушкина Т. В., Свердюк В. В., Широков И. Б.</b> Нанесение многофункционального теплозащитного покрытия автоматизированным методом .....	281
<b>Цугленок М. Н.</b> Контроль управляющей программы в среде «vericut» для обрабатывающих центров при изготовлении деталей РКТ .....	283
<b>Цугленок М. Н., Герман А. С.</b> СОФТ для проверки управляющей программы для станков ЧПУ .....	285
<b>Шевченко Т. А.</b> Высокотемпературная газостатическая обработка деталей турбонасосного агрегата .....	287
<b>Шестаков И. Я., Хилюк А. В., Слепнева Н. Г., Бабкина Л. А.</b> Рентгенофазовый анализ твердых осадков химического фрезерования деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов .....	289
<b>Ширшов Е. О., Сугак Е. В.</b> Решение проблем рабочей зоны при измерении объемов в ракетно-космической технике .....	291

## Секция

## «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»

<b>Беляев Б. А., Ходенков С. А., Чурикова Т. И.</b> Сверхширокополосный фильтр на микрополосковом многомодовом резонаторе .....	294
<b>Вдовин Н. Е., Олейников Е. П.</b> Пассивные системы управления ориентацией спутника .....	296
<b>Гринберг Г. М., Егорова П. Г., Нуруллаев Н. М.</b> Экспериментальное исследование применимости драйвера L298N для управления электродвигателем Д82 .....	298
<b>Жуков А. О., Карцан И. Н.</b> Перспективы повышения измерительной информации для определения параметров орбиты космических аппаратов .....	300

<b>Мизрах Е. А., Колохматова С. А., Соболева Т. С.</b> Анализ устойчивости стабилизатора напряжения модифицированным критерием Найквиста .....	303
<b>Осипенко Т. С., Крылов Ю. В., Преснов В. Н.</b> Двухзеркальная осесимметричная антенна с модифицированными профилями рефлектора и контррефлектора .....	305
<b>Поздняков А. А., Князев В. О., Мальков Ю. Ю., Шамунов С. А., Киселёв А. В.</b> Программно-аппаратные макеты оптико-электронных приборов для наземной экспериментальной отработки систем ориентации и стабилизации .....	308
<b>Положенцев Д. С.</b> Частотный анализ двухдатчиковой системы управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса .....	311
<b>Шестаков Е. Н., Осипенко Т. С.</b> Математическое моделирование параметров рупорной антенны по измерениям поля в ближней зоне .....	314
<b>Штабель Н. В., Самотик Л. А., Мизрах Е. А.</b> Система комплексной защиты системы электропитания космического аппарата при наземных испытаниях .....	317
<b>Шуринова Д. А., Коваленко А. Н., Мурыгин А. В., Суворов А. Г.</b> Разработка структуры сообщения между элементами rfid-системы .....	320
<b>Шуринова Д. А., Коваленко А. Н., Мурыгин А. В., Суворов А. Г.</b> Подключение стенда заправки хладагентов к RFID-системе при производстве холодильников .....	323

## Секция

## «КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

<b>Васильев И. С., Климкин О. А., Сунцов С. Б., Фризоргер В. Г.</b> Технология изготовления силовых модулей для системы электропитания космических аппаратов .....	326
<b>Виноградов Д. С., Кортенко А. В., Иванющенко А. А., Алексанов П. А.</b> Выбор оптимальной конструкции бесконтактной системы начала вращения для стенда измерения момента трогания шарикоподшипников .....	328
<b>Дружинин А. А., Асочаков А. С.</b> Измерение частотных характеристик импульсного источника питания с цифровой системой управления .....	330
<b>Дружинин А. А., Асочаков А. С.</b> Система измерений частотных характеристик на базе программы Labview .....	333
<b>Калюжная А. Б.</b> Устройства на основе LTCC-керамики .....	336
<b>Лепёшкина Е. С.</b> Проблема сбоеустойчивости криптографических систем в составе бортовых систем космических аппаратов .....	338
<b>Миронов А. А.</b> Опыт разработки средств электропитания радиоэлектронной аппаратуры космических приборов .....	340
<b>Недорезов Д. А., Красненко С. С.</b> Развитие методов испытаний бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов на основе внесения неисправностей .....	342
<b>Шерстенникова Г. Н., Шаура А. С.</b> Определение дозовых нагрузок в местах установки ЭРИ с учетом реального экранирования .....	344

## Секция

## «ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

<b>Горбась А. В., Конькова Н. А., Кузьмин В. В., Пономарев А. А.</b> Технология защитно-идентификационной химической маркировки электронных компонентов военного и космического назначения .....	348
<b>Горбачев И. П., Корбанкова Т. Ю., Кулибаба А. Я., Сашов А. А.</b> Способы обнаружения признаков контрафактной электронной компонентной базы .....	349
<b>Королев А. В., Муаллем В., Бердичевский К. В.</b> Новые ПЛИС европейского производства для применения в бортовой аппаратуре КА .....	351
<b>Кулибаба А. Я., Сашов А. А., Суконкин М. К., Штукарев А. Ю.</b> Анализ влияния входного контроля и дополнительных испытаний на надежность партий электронной компонентной базы .....	352

<b>Кулибаба А. Я., Суконкин М. К., Штукарев А. Ю., Юшин О. В.</b> Методика оценки сохраняемости электронной компонентной базы на основе анализа деградации её параметров .....	355
<b>Куликов А. В., Мешковский И. К., Ефимов М. Е., Волковский С. А.</b> Оптоэлектронный модуль опроса волоконно-оптических датчиков для температурного, вибрационного и акустического контроля в космических системах .....	358
<b>Масич И. С., Федосов В. В., Краева Е. М.</b> Применение логических решающих правил для классификации электрорадиоизделий .....	361
<b>Орлов В. И., Шкаберина Г. Ш., Рожнов И. П., Попов В. П., Казаковцев Л. А.</b> Применение жадных эвристических алгоритмов для задачи выделения однородных производственных партий электрорадиоизделий .....	363
<b>Орлов В. И., Федосов В. В., Голованов С. М.</b> Применение итеративного алгоритма максимизации критерия силуэта для формирования однородных групп электронной компонентной базы .....	366
<b>Побоженский С. А., Ширяев Д. В.</b> Нейросетевой программно-аппаратный комплекс для автоматизации анализа структуры интегральных микросхем .....	369
<b>Рожнов И. П., Казаковцев Л. А., Орлов В. И., Лапунова Е. В.</b> Применение нового подхода разработки алгоритмов автоматической группировки для формирования электронной компонентной базы с особыми требованиями качества .....	371
<b>Старцев В. Н., Семенов А. В.</b> Контроль надежности статической оперативной памяти с помощью свойств физической неклонировуемости .....	373
<b>Трифанов В. И., Карелина Е. А., Трифанов И. В.</b> Расчет силы волочения при изготовлении труб волноводов .....	375
<b>Трифанов В. И., Суханова О. А., Трифанов И. В.</b> Способы защиты космических аппаратов от космической радиации .....	377

## Секция

## «КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»

<b>Баранов М. Е., Кравченко А. В., Лапко Р. В.</b> Проблемы получения достоверных оценок летно-технических характеристик при проведении испытаний ракетно-космической техники и пути их решения .....	380
<b>Мальшенко А. М., Беляев А. С.</b> Оценка реализуемости обезвешивания крыльев солнечных батарей при их наземных испытаниях с помощью робокаров .....	383
<b>Пустобаев М. В., Шматков А. В., Зубренков Б. И., Грабилин А. О., Деришев Д. В.</b> Особенности выбора оснастки для испытаний крупногабаритной БА на пиродарные нагрузки .....	386
<b>Пчелкина Т. А., Карелина Е. А., Снежко А. А.</b> Особенности обеспечения единства линейно-угловых измерений .....	391
<b>Синева М. В., Воеводкин Г. С., Вагапова Н. Т.</b> Универсальный метод оценки электрических параметров многокаскадных солнечных элементов .....	393
<b>Устименко В. В., Михайленко Л. А.</b> Имитация термовакuumных испытаний в среде SimInTech .....	395
<b>Фролова И. В., Шпет Н. А., Солдатов А. И.</b> Алгоритмы обработки данных с использованием фазированных антенных решеток .....	398
<b>Шабалина Д. А., Жирнова Е. А.</b> Контроль метрологических характеристик при аттестации пробойной установки .....	400
<b>Шуринова Д. А., Суворов А. Г., Коваленко А. Н., Мурыгин А. В.</b> Разработка испытательного стенда для проверки калибровки датчиков расхода ракетного топлива .....	402

## Секция

«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ»

<b>Байтерьяков А. В., Шатеркин Н. С., Матвеев В. В., Садыков А. Р.</b> Разработка аппаратуры перспективной КИС для малого КА стандарта CCSDS .....	405
<b>Карягин А. А., Олейников Е. П.</b> Система автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов .....	408

<b>Миленин Д. В., Олейников Е. П.</b> Современное состояние и перспективы развития малых космических аппаратов .....	410
<b>Репин А. А., Олейников Е. П.</b> Эксплуатация и преимущества малых космических аппаратов .....	412

## Секция

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

<b>Бахтина А. В.</b> Информационная система анализа данных дистанционного зондирования на основе непараметрических алгоритмов принятия решений .....	415
<b>Гончаров А. Е., Юронен Ю. П.</b> Интерпретация и дешифрирование изображений с гидролокатора бокового обзора, полученных в ходе полевых исследований в акватории нижнего и среднего течения реки Енисей .....	417
<b>Гончаров А. Е.</b> Специфика и методика использования гидролокатора бокового обзора в акватории реки Енисей .....	420
<b>Им С. Т., Ли В. Г.</b> Динамика сомкнутости темнохвойных лесов Средней Сибири в XXI веке .....	423
<b>Им С. Т., Ли В. Г.</b> Методика ГИС-анализа северной границы лесов .....	425
<b>Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Шеляпина К. В.</b> Особенности атмосферной динамики в стратосфере южного полушария весной 2014–2015 гг. по данным OMI/AURA .....	427
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Выбор количества интервалов дискретизации области значений многомерной случайной величины .....	430
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Выбор коэффициентов размытости в многомерных ядерных оценках плотности вероятности при статистических данных большого объёма .....	432
<b>Макаров Д. С., Харламов Д. В., Сорокин А. В.</b> Радиоскопия леса сигналами навигационных спутников диапазона L1 .....	434
<b>Платонова Ю. В., Комиссарова О. Ю.</b> Дистанционные методы экологического мониторинга загрязненности снежного покрова .....	436
<b>Тубольцев В. П., Авдеев В. Л.</b> Непараметрический алгоритм автоматической классификации и его применение при обработке данных дистанционного зондирования .....	438

## Секция

**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

<b>Акзигитов А. Р., Дмитриев Д. В.</b> Анализ системы предупреждения столкновений самолетов в воздухе TCAS II и ее режимов TA/RA .....	442
<b>Афанасьева А. В., Гильманов Д. С., Балаганский Р. В.</b> Оценка технических рисков системы управления надежностью жизненного цикла авиадвигателя вертолета Ми-8 .....	444
<b>Бойко О. Г., Легкова Т. А.</b> Исследование эффективности процесса планирования доставки ресурсов на Ванкорское месторождение авиационным транспортом .....	446
<b>Леонов С. В., Ткаченко С. А., Колесников Р. С., Бойко О. Г.</b> Исследование эффективности использования самолёта Як-42 по данным авиапредприятия АО «КрасАвиа» .....	448
<b>Огородникова Ю. В., Лукасов В. В., Майнашева С. О.</b> Коррозионные повреждения конструкции планера самолета гражданской авиации .....	451
<b>Петлинский Д. Е., Олейников Е. П.</b> Использование БПЛА в современном мире .....	453
<b>Писарев Н. С., Стаценко Н. И., Акзигитов Р. А.</b> Разработка комплексной системы повышения безопасности .....	455
<b>Саяпин А. В., Герасимова Д. С.</b> Предполагаемые авиакатастрофы 2025 года .....	458
<b>Ткаченко С. А., Леонов С. В., Сяков Е. Е., Бойко О. Г.</b> К вопросу о совершенствовании технологического процесса технического обслуживания топливной системы самолета Ан-24 .....	460
<b>Филиппов А. А., Олейников Е. П.</b> История и перспективы применения беспилотных летательных аппаратов .....	463

## Секция

## «ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

<b>Большаков Р. С., Елисеев С. В.</b> Особенности оценки динамического состояния системы подвески объекта при вибрационных возмущениях .....	466
<b>Васильева Е. К., Новосельский Н. К., Сысоев А. С.</b> Обеспечение точности при абразивно-экструзионной обработке .....	469
<b>Деунжева М. А., Терина Е. А., Тутушкин А. К., Терин А. М., Фадеев А. А.</b> Применение риск-ориентированного подхода при испытаниях перспективного привода колеса летательного аппарата .....	472
<b>Евсеев Ф. Д., Громаков А. И., Михнёв М. М.</b> Разработка технологии изготовления литых деталей с применением аддитивных технологий .....	474
<b>Елисеев С. В., Кузнецов Н. К., Елисеев А. В.</b> Межпарциальные связи в формировании динамических состояний механических колебательных систем с двумя степенями свободы .....	476
<b>Зайцев Р. В., Скачков И. А., Злобин С. К.</b> Применение низкотемпературной пайки при изготовлении волноводно-распределительных трактов космических аппаратов связи .....	478
<b>Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Ананьев В. В., Скачков И. А., Злобин С. К.</b> Гибкие волноводные секции в системах волноводно-распределительных трактов космических аппаратов связи .....	480
<b>Захарова Н. В., Малько Л. С., Захаров Л. С.</b> Повышение долговечности червячной пары с изогнутым профилем путем нанесения износостойкого покрытия .....	482
<b>Максимчук М. М., Панаськов А. О., Шумилина Я. Е., Серафимов М. Н.</b> 3D-принтер с автоматической сменой рабочей головки .....	485
<b>Малько Л. С., Сутягин А. В., Суханова О. А., Захарова Н. В.</b> Образование зацепления контактных поверхностей глобоидно-цилиндрической пары с выпукло-вогнутыми профилями сопряженных звеньев .....	487
<b>Панаськов А. О., Шумилина Я. Е., Максимчук М. М.</b> Техническое зрение автономных мехатронных систем .....	489
<b>Семейных Ю. А., Двирный В. В.</b> Комплектующие систем обеспечения теплового режима элементов узлов, агрегатов космических аппаратов при проведении наземных испытаний .....	491
<b>Скачков И. А., Ананьев В. В., Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Злобин С. К.</b> Модернизация орбитальной сварочной головки неповоротных стыков тепловых труб .....	493
<b>Трифанов В. И., Пчелкина Т. А., Трифанов И. В.</b> Технологические возможности анодно-абразивного полирования труб малого диаметра .....	495
<b>Тутушкин А. К., Терин А. М., Раменская Е. В., Филиппов Ю. А.</b> Кинематика процесса пиления труб .....	496
<b>Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Кирбижекова В. В., Шестаков В. И., Яхонтов М. М.</b> Управление установкой электрообработки металлов .....	498
<b>Филиппов К. Ю., Спицын И. Н., Раменская Е. В., Филиппов Ю. А.</b> Опытное определение подачи на зуб при резке трубы .....	501
<b>Филиппов К. Ю., Раменская Е. В., Раменский В. В., Филиппов Ю. А.</b> Заточка дисковых пил с планарными режущими зубьями .....	503
<b>Филиппов К. Ю., Раменский В. В., Пронин А. В., Янковская Н. Ф.</b> Текстура поверхности фрезерования деталей КА .....	505
<b>Черепанов А. И., Бермешев Т. В., Жереб В. П., Таскин В. Ю.</b> Влияние быстрозакристаллизованных лигатур на эффект модифицирования сплава АК12 .....	507
<b>Шумилина Я. Е., Панаськов А. О., Максимчук М. М.</b> Уплотнение выходного вала движителей подводного мехатронного модуля .....	509
<b>Щербакова А. В., Савенков А. А., Рублевская Е. В., Сутягин А. В., Маслова О. В.</b> Влияние температуры и времени до прессования на толщину изделия .....	511

Секция  
«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ»

<b>Горбенко Т. И., Горбенко М. В., Енков М. О.</b> Расчет механического захватного устройства промышленного робота .....	515
<b>Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Шерстюков В. Г.</b> Двухкаскадная холодильная установка для испытаний карданных передач холодом .....	517
<b>Ереско Т. Т., Ермиенко И. Ю., Ермиенко Н. А.</b> Исследование напряжений в конструкциях вилок карданных передач .....	520
<b>Жубрин В. Г., Ереско А. С., Ереско С. П.</b> Модернизация гидропривода поворотной платформы землеройной машины на основе динамического анализа .....	523
<b>Иванов Ю. Ф., Клопотов А. А., Ереско С. П., Петрикова Е. А., Лопатин И. В.</b> Многоцикловое поверхностное легирование силумина титаном .....	526
<b>Климов А. А., Стручков А. В.</b> Результаты экспериментальных исследований износа тормозных локомотивных колодок .....	529
<b>Кукушкин С. В., Чабукашвили Т. Г., Чайкина К. А., Шерстюков В. Г.</b> О климатических испытаниях карданных передач .....	531
<b>Кустов А. В., Корнев В. М.</b> Динамика образования паровых пузырей на вихревой ректификационной ступени .....	533
<b>Цаплин П. В., Ереско С. П.</b> Теоретическое обоснование технологии калибрования древесно-стружечных плит комбинированным методом .....	536

Секция  
«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»

<b>Бегишева О. Б., Бандурина О. Н., Аплеснин С. С., Ситников М. Н.</b> Магнитосопротивление и магнитоимпеданс в парамагнитной области в твердых растворах $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ .....	540
<b>Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г., Рассказов И. Л., Карпов С. В.</b> Поверхностные решеточные резонансы в гибридных плазмонно-фотонных наноструктурах .....	542
<b>Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г., Рассказов И. Л., Карпов С. В.</b> Гибридные моды электромагнитного поля в периодических наноструктурах из алюминия .....	545
<b>Даниленко Е. Г., Никитина А. Е., Сафронова А. А., Телегин С. В.</b> Исследование влияния функциональных добавок в композиционном слое радиационного экрана .....	547
<b>Ершов А. Е., Герасимов В. С., Гаврилюк А. П., Карпов С. В.</b> Динамическая фотомодификация неупорядоченных агрегатов плазмонных наночастиц .....	550
<b>Заичко К. В., Ивленков Д. В., Ильвутиков С. А., Шарангович С. Н.</b> Применение точечных датчиков с волоконной брэгговской решеткой для контроля температуры в многослойной печатной плате .....	552
<b>Закомирный В. И., Герасимов В. С., Ершов А. Е., Карпов С. В.</b> Узкие резонансы в периодических диэлектрических структурах конечного размера .....	554
<b>Коновальчиков А. И., Лапухин Е. Г.</b> Программа определения периода разнесенных во времени измерений и визуализация данных .....	556
<b>Костюков А. С., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Карпов С. В.</b> Терапия злокачественных новообразований с помощью магнитных наночастиц, активируемых низкочастотным магнитным полем .....	558
<b>Крегинин В. В., Аплеснин С. С.</b> Фотоиндуцированный диодный эффект в ИК-области в пленках $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$ .....	561
<b>Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В.</b> Исследование в высоковольтном электронном микроскопе кинетики образования атомных и вакансионных скоплений в полупроводниках $\text{A}_2\text{B}_6$ при облучении электронами с энергией 400 КэВ .....	563
<b>Масюгин А. Н., Бедишева О. Б.</b> Магнитоэлектрический эффект и ИК-спектроскопия пленок $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ .....	565
<b>Ситников М. Н., Харьков А. М., Мироненко В. В., Филипсон Г. Ю.</b> Электрические свойства в полупроводниках $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ .....	567



<b>Тамбасов И. А., Волочаев М. Н., Федотов В. А., Тамбасова Е. В., Горнаков М. О.</b> Синтез тонких нанокomпозитных $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ пленок с контролируемым размером наночастиц $\text{Co}$ .....	569
<b>Утюшев А. Д., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Рассказов И. Л., Карпов С. В.</b> Разработка новых типов оптических высокочастотных фильтров из массивов наночастиц для широкого диапазона длин волн .....	571
<b>Харьков А. М., Ситников М. Н., Рыбина У. И., Южно М. Ю.</b> Термоэмиссионный ток и термоЭДС в $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ .....	573
<b>Щеглова М. С., Балашов Ю. Ю., Волочаев М. Н.</b> Применение быстрого преобразования Фурье для фильтрации и анализа электронно-микроскопических изображений высокого разрешения .....	575

## Секция

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
(ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА, ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ  
И ПЛАСТИЧНОСТИ, РЕОЛОГИЯ)»**

<b>Автономов Н. Н., Тололо А. В.</b> Использование титанового шара для индентирования исследуемого материала .....	579
<b>Андреев В. К., Степанова И. В.</b> Об однонаправленном движении бинарной смеси .....	581
<b>Варьгина М. П., Смолехо И. В.</b> Численное моделирование .....	583
<b>Вяткин А. В., Кучунова Е. В.</b> Параллельная реализация численного метода для моделирования трехмерного течения вязкого теплопроводного газа в трубе .....	585
<b>Белолипецкий В. М., Генова С. Н.</b> О численной модели заглублиения турбулентного слоя в нелинейно стратифицированной жидкости .....	587
<b>Гилева Л. В., Карпова Е. Д.</b> Применение специальных эрмитовых конечных элементов для решения трехмерного уравнения Пуассона .....	589
<b>Еремин Н. В.</b> Модельная оценка прочности композиционного материала с учетом исходной поврежденности .....	591
<b>Ефимова М. В.</b> Задача о малых возмущениях конвективного двухслойного течения с учетом энергии межфазного теплообмена .....	593
<b>Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Мацулев А. Н., Симонов К. В.</b> Интерпретация данных системы GRACE для решения задач геодинимического мониторинга .....	595
<b>Кондратов А. С.</b> Полулагранжевый метод численного решения уравнения неразрывности .....	598
<b>Мартюшев С. Г.</b> Анализ зависимости напряжений и ускорений в бортовой аппаратуре космического аппарата от резонансных частот при ударных нагрузках .....	600
<b>Матвеев А. Д.</b> Построение многосеточных конечных элементов для расчета цилиндрических оболочек на основе образующих конечных элементов .....	603
<b>Немировский Ю. В., Федорова Н. А.</b> Примеры решения обратных задач слоисто-волоконистых конструкций с криволинейным армированием .....	606
<b>Перетокин С. А., Миронов В. А., Симонов К. В.</b> Сравнение программного обеспечения вероятностного анализа сейсмической опасности на основе метода Монте-Карло .....	608
<b>Петраков И. Е.</b> Об уточненном уравнении изгиба тонкого упругого стержня .....	611
<b>Сабилов Р. А.</b> К расчету деформированного состояния изгибаемых плоских криволинейных стержней методом Ритца .....	613
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Использование законов сохранения для решения задачи о течении вязкопластической жидкости .....	616
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Метод решения динамических уравнений идеальной пластичности .....	617
<b>Смолехо И. В.</b> Численный анализ эффекта Фредерикса на основе акустического приближения модели жидкого кристалла .....	619
<b>Шанько Ю. В.</b> О решениях с функциональным произволом уравнения неоднородной акустики .....	621

Секция  
«ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

<b>Андреева А. В., Бобров П. С., Любяшкин А. В., Товбис М. С.</b> Доказательство строения ранее синтезированных 1-н-пропил и 1-изопропилзамещенных 4-аминопиразолов методами ЯМР <sup>1</sup> H спектроскопии и хромато-масс спектрометрии .....	624
<b>Андреева А. В., Бобров П. С., Любяшкин А. В., Товбис М. С.</b> Синтез новых ацетильных производных 4-аминопиразолов .....	627
<b>Антишин Д. В., Мирошниченко А. А., Краснов М. С., Толмачева А. Е.</b> Исследование эвтектических систем многокомпонентных энергоемких материалов .....	630
<b>Бобров П. С., Андреева А. В., Любяшкин А. В., Субоч Г. А.</b> Изучение взаимодействия 3-гидразиноксалин-2(1н)-она с изонитрозобензоилацетоном .....	633
<b>Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Голубцова О. А., Белова Е. А., Ломачко А. Е.</b> Катализ термического разложения 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана .....	636
<b>Курочкина Е. Ю., Селина С. Н., Гаврилова Н. А., Субоч Г. А.</b> Синтез производных n-3-нитробензелиденхинолин-5-аминов .....	639
<b>Персидская Д. И., Кукушкин А. А., Роот Е. В.</b> Восстановление азосоединений, как альтернативный метод получения 4-амино-3-метоксиметил-5-(4-бромфенил)-1н-пиразола .....	641
<b>Слыщенко Е. П., Вагапова Н. Т.</b> Подбор режимов фотолинтографии на отечественных фоторезистах в технологии изготовления фотопреобразователей .....	644
<b>Снежко А. А., Кашапова Н. Р., Васильева Е. К., Воробьева Ю. И., Эмилбекова З. Э.</b> Связь ядерной структуры со свойствами химических элементов .....	646
<b>Сорокин И. В., Коротких А. Г.</b> Исследование параметров активности порошков алюминия, бора, боридов алюминия и титана .....	649
<b>Усольцева А. В., Гаврилова Н. А., Субоч Г. А.</b> Взаимодействие 5-нитрозо-8-хинолинола с тетраметилендиамином .....	652

## CONTENTS

### *Section*

#### “PROJECTING AND PRODUCTION OF AIRCRAFT, SPACE RESEARCH WORKS AND PROJECTS”

<b>Aghev R. N., Osipov D. A., Stoyanovskiy S. R., Ganjin A. G., Belyackiy M. S.</b> Design of the strategic unmanned aircraft .....	6
<b>Aleshina A. S., Zamyatin D. A., Kolga V. V.</b> The designing of payload rescue system .....	9
<b>Baranova E. G., Oreshenko T. G., Kharlashina S. V.</b> Modern algorithms for calculating the flight diagrams of the interplanetary aircraft .....	12
<b>Baranova E. G., Oreshenko T. G., Kharlashina S. V.</b> Formation of low-cost flight schemes within the Solar system .....	14
<b>Baranova E. G., Oreshenko T. G., Kharlashina S. V.</b> Problems and prospects for the design of navigation systems and orientation of unmanned aerial vehicles .....	16
<b>Vlasenko A. V., Rozhkov I. P., Kleshnina I. A.</b> Topological optimization in aircraft designs .....	18
<b>Gordienko E. S., Simonov A. V., Khudorozhkov P. A.</b> Flight missions to the Moon for delivering lunar soil design .....	20
<b>Dremukhin M. A., Mishin S. V., Saveliev R. A., Gogulaev D. V.</b> Production of a reflector from polymeric composite materials .....	22
<b>Ermakov D. V.</b> Damper of vibration protection system of the engine-flywheel of the spacecraft .....	24
<b>Zamyatin D. A., Kolga V. V.</b> Building anisogrid supporting structure of the spacecraft adapter .....	26
<b>Karmanova A. V., Mishin S. V., Saveliev R. A., Gogulaev D. V.</b> Three-point the flexible suspension crane to move the spacecraft .....	28
<b>Klyuchnikov A. V.</b> The algorithm of single-plane dynamic balancing of a conical flying prototype with optimization by criteria of achieve the minimum deviation of main central axis of inertia .....	30
<b>Leongard A. P., Kazancev Z. A.</b> Development of the spacecraft concept for group start .....	33
<b>Leonov S. N., Semkin P. V., Kudryashov A. S., Bessmertnaya J. S., Vnukov A. A.</b> Analysis of the possibility of using spacecraft transponders in the libration points of the Earth-Moon system .....	35
<b>Lukonin N. V.</b> Group of surface mounting of electronic components of radio electronic equipment of spacecrafts .....	37
<b>Lykum A. I., Marchuk M. E., Nadein I. O., Kolga V. V.</b> Multiple one-stage carrier rocket .....	40
<b>Marchuk M. E., Nadein I. O., Kolga V. V., Bykov A. V., Lykum A. I.</b> Returned stage .....	42
<b>Mikhina I. S., Shendalev D. O., Zhuravlev V. Yu., Babkina L. A., Kalinnikov Ya. E.</b> Numerical modeling of a thin-walled shell in large curve areas in the MSC Nastran software package .....	44
<b>Mustafinov K., Anarov M., Konoplya P., Mayer M., Aidos K., Shakhmatov E.</b> Optimal design of the fairing of the rcn side block .....	47
<b>Nadein I. O., Kolga V. V., Bykov A. V., Marchuk M. E., Lykum A. I.</b> Air launch carrier-rocket concept .....	50
<b>Orlov S. A., Kopytov V. I., Matveev K. A.</b> About some problems arising in tests of large-dimensional structures of spacecraft on shock impacts of high intensity .....	52
<b>Savenkov A. A., Shcherbakova A. V., Rublevskaja E. V.</b> Comparison of brazing alloys and fluxing materials for rational conditions of copper mesh soldering .....	54
<b>Stukalov A. A.</b> Design of structural elements in engineering production with the use of generative design .....	56
<b>Terekhina V. S., Fischenko A. V., Rudich A. I., Lisin V. A.</b> Development of a CNC mechanical area for the manufacture of assemblies of the ground antenna .....	58
<b>Timofeev V. V., Nesterov V. A.</b> The deformation of a composite parabolic antenna under local thermal loading .....	60
<b>Khafizov D. E., Kazantsev V. V., Leonov A. P., Yefremov S. V.</b> The electrical parameters determination of on-board cables harness under influence of external factors .....	63

Section

“LARGE TRANSFORMABLE CONSTRUCTIONS OF SPACECRAFT”

<b>Iseeva O. A.</b> Prospects of application of shape memory polymers in the space industry .....	67
<b>Iseeva O. A.</b> Comparative analysis of power body structures of modern non-sealed satellites .....	70
<b>Leonenkov A. D., Oberemok Yu. A., Vinogradov K. N.</b> Prospects of application structures manufactured by 3D printing of metal alloys in the framework of the space telescope “Millimetron” .....	72
<b>Azin A. V., Kuznetsov S. A., Ponomarev S. V., Rikkonen S. V.</b> Simulation of linear piezoelectric motor operating modes .....	74
<b>Ananiev V. V., Golovanova V. V., Ermolaev V. A.</b> Deep seasonal soil thermostabilizers .....	76
<b>Batsaev S. S., Laizan V. V., Tsytyrkin N. G.</b> Method of manufacturing honeycomb panels from polymer composite materials .....	78
<b>Belkov A. V., Belov S. V., Zhukov A. P., Ponomarev S. V., Shendalev D. O.</b> Numerical methods for spacecraft large-sized deployable reflectors .....	80
<b>Berns V. A., Krasnorutskiy D. A., Lakiza P. A., Marinin D. A., Zhukov E. P.</b> Numerical-experimental method of modal analysis of large-sized transformable structures .....	82
<b>Bratysheva V. E., Orlov D. V., Pestov A. B.</b> Optimization method for geometry of mirror antennas with special pattern .....	84
<b>Velichko A. I., Kisanov Yu. A., Tserikhov V. I., Matrosova I. V.</b> Optimization of the deployment mechanism of the rimmed space reflector .....	86
<b>Viktorov A. I., Shorkin V. S.</b> The application of the anti-diffusion layer in the movable mechanisms of space technology .....	88
<b>Goncharov K., Panin Yu., Khmel'nitsky A.</b> Research and development of honeycomb panels and radiators with high conductivity carbon-epoxy skins .....	91
<b>Evdokimov A. S., Shendalev D. O., Valishevskaya M. G., Valishevsky O. K.</b> Formulation of the problem of selection of large reflector precision boom laminate .....	93
<b>Evstigneeva E. I., Konoplev Yu. V., Yuev A. A., Sandul D. A., Tolmachev A. S.</b> Development of the actuation point' drive system for the wireless shape control of large transformed structures .....	95
<b>Efremov S. V., Karpov N. A., Leonov A. P.</b> The choice of materials for onboard cable network of spacecraft at cryogenic temperature operating .....	97
<b>Zavyalov P. S., Zhimuleva E. S.</b> Inspection and adaptation of the “Millimetron” space observatory mirror system by Foucault knife-edge test .....	99
<b>Zarubin V. S., Zimin V. N., Koloskov I. M., Pavlov N. G., Filippov V. S.</b> Experimental investigations of an actuator for deployment of transformable space structures which is made of material with a shape memory effect .....	102
<b>Zommer S. A., Ivanov A. V., Kravchunovsky A. P., Orlin P. A.</b> Designing a mechanical device of solar battery for high-energy spacecraft platforms .....	104
<b>Ivanov A. V., Timofeev A. N., Zommer S. A.</b> Development of a system for laying thermal screens of the space telescope «Millimetron» .....	107
<b>Ivanov E. A.</b> State of stress glue line P-graphic fitting .....	109
<b>Kozhevnikova L. A.</b> Oversized S-band antenna for communications satellite .....	112
<b>Kopylov K. V., Ovchinnikov A. N., Voronchikhin V. D., Shalygina T. A., Voronina S. Yu.</b> Comparative analysis of carbon fabrics constructional purposes .....	114
<b>Kochin L. B., Matveev S. A., Tishkov A. I., Shirshov A. D., Yakovenko N. G.</b> Development of a wireless control system for large-sized transformable constructions .....	117
<b>Koshelev P. E., Shirshov A. D., Tolmachev A. S., Evstigneeva E. I., Konoplev Y. V.</b> System of energy and information transfer via open optical channel for space antenna shape control .....	119
<b>Kravchunovsky A. P., Zommer S. A.</b> Numerical investigation of microvibration based on the finite-element model of spacecraft .....	121
<b>Laizan V. V., Taygin V. B., Batsaev S. S.</b> Method to adjust the reflector profile of polymer composite materials during its manufacturing .....	124
<b>Likhachev A. N.</b> Study of the deformation of a reconfigurable structure based on an auxetic composite structure with a controlled Poisson's ratio .....	126
<b>Lushin I. A., Kravchenko I. A.</b> Efficiency of satellite increasing by correction system executive automatos unifying .....	129

<b>Martynova E. Y., Prostackishin R. P., Osheko P. V.</b> Development of a universal tilter for the assembly of the payload module (MPN) of heavy class spacecraft .....	131
<b>Moiseev P. P., Nechushkin I. I.</b> Sine-cosine angular position sensor .....	133
<b>Moiseev P. P., Nechushkin I. I.</b> Trigger mechanism with intermediate stop for deployment of the spacecraft structures .....	136
<b>Presnov V. N., Leonenkov A. D., Oberemok Yu. A., Osipenko T. S.</b> Topological optimisation of elements of construction of command-measuring's systems .....	138
<b>Pushnitsa A. S., Voronchikhin V. D., Shalygina T. A.</b> Research of thermal stability of ethylene-propylene rubbers .....	141
<b>Seryakov A. V., Alekseev A. P.</b> Short heat pipes investigation by the monotonic heating method .....	144
<b>Tolmachev A. S., Koshelev P. E., Yuev A. A., Sandul D. A., Zemtsova P. I.</b> Development of a computer vision system for monitoring and analysis of light signals of executive devices of large transformed structures .....	147
<b>Tyupkin S. S., Batrutdinov R. G., Obvertkin I. V., Vlasov A. Y.</b> Comparison of structural materials for the choice of manufacturing technology of large-size radio-transparent products .....	149
<b>Halimanovich V. I., Berns V. A., Krasnorutskiy D. A., Luchin V. N., Marinin D. A.</b> Problems of experimental modal analysis of large-sized transformable space structures .....	151
<b>Shalygina T. A., Voronina S. Yu., Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Obvertkin I. V.</b> Calorimetric researches with temperature modulation of the transition layer formed by diffusion adhesion of epoxy carbon fiber and polyurethane matrix .....	154
<b>Yuev A. A., Shirshov A. D., Evstigneeva E. I., Koshelev P. E., Konoplev Y. V.</b> Development of the wireless system of control and monitoring for electronic system .....	157

## Section

## “PROJECTING, PRODUCTION AND TESTING OF AEROSPACE ENGINES”

<b>Agaev R. N., Agaev N. Z., Osipov D. A., Koroteev A. V., Ganjin A. G.</b> Designing the power plant of a strategic unmanned aircraft .....	161
<b>Astashov I. V., Belkevich A. I., Mironov P. A.</b> Methods to increase the energy parameters of the LPRE .....	164
<b>Alekseev K. V., Volosyanikov A. V., Korolev A. S., Nesterov V. D.</b> Investigation of heat transfer of laminar flows in elements of turbine flow parts .....	166
<b>Balenkov D. S., Sokolov D. A., Dubynin P. A., Tolstopyatov M. I.</b> Methods of testing and processing of experimental data of booster electric pump units .....	168
<b>Begishev A. M., Zhuravlev V. Yu.</b> Comparative analysis of calibration systems of thrust-measuring devices of test stands for liquid rocket engines .....	171
<b>Grachev I. A., Kudashov E. V., Bolotov M. A.</b> Computer simulation of low pressure compressor rotor assembly .....	173
<b>Ermakov P. A., Kubrikov M. V.</b> Five-axis machining in rocket engine manufacturing .....	176
<b>Zhezhera S. A., Neizvestnykh A. A., Tyutyunnikov T. V., Fedorov M. A., Zuev V. O.</b> Software complex calculations of hydrodynamic and thermal parameters of the calculation of elements in flowing parts of power plants .....	178
<b>Zhuikov D. A.</b> The method for selecting the laws of friction in the calculation of hydraulic losses in the channels of LPRE turbomachinery .....	181
<b>Zuev A. A., Arngold A. A.</b> Analytical approach for determination of local heat transfer coefficient in boundary conditions of rotation cavities .....	183
<b>Zuev A. A., Arngold A. A.</b> Disc friction in determining the power balance of LRE TNA .....	185
<b>Konozobkin Yu. V., Ledkov Ya. Yu.</b> Methods of improving the quality of the internal cavities of the turbo-pump unit of the liquid rocket engine .....	187
<b>Lotarev D. A., Ratkin S. A.</b> Development of technology of weaving profile pipes from composite materials with a section containing a cross compound .....	189
<b>Nazarov V. P., Savchin D. A., Nazarova L. P.</b> The accuracy increasing in the obtaining of the centrifugal pump cavitation characteristic .....	191
<b>Nazarov V. P., Yatsunenko G. S.</b> Perspective issues of LOX/LH LRE bench testing .....	193

<b>Nevatus I. S., Buzunov V. K., Muravyov P. S.</b> Hydrodynamic and thermal flow parameters in the cavities of the rocket engine pumps .....	195
<b>Pechenin V. A., Grachev I. A., Ruzanov N. V., Bolotov M. A.</b> Development of valid object models for the conditions of digital production .....	197
<b>Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu.</b> Aktual problems of the production of 3d-models of pipelines .....	200
<b>Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu.</b> Optimum design and functioning of the bending unit in the production of pipelines of complex configuration .....	203
<b>Torgashin A. S., Zhuikov D. A.</b> To the formulation of the cavitation modeling in a turbopump of LPRE .....	205
<b>Yakovlev A. A., Petetskaya A. E., Volchkova E. I., Vaikus A. L.</b> Features of the algorithm for calculating the flow with heat transfer in power plants of aircraft .....	207

Section

“HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES IN AIRCRAFT, POWER STATIONS AND LIFE SUPPORT SYSTEMS”

<b>Bulov A. O., Ermakov M. A.</b> The prospects of vacuum refrigeration machines development .....	210
<b>Vasiliev I. M., Dementev A. A.</b> Experimental and theoretical heat transfer study taking into account contact thermal resistance .....	213
<b>Delkov A. V., Umnikov E. K., Larin G. G., Rudko S. V., Sheydayev E. B.</b> Numerical modeling of free heat convection at different location of heat sources .....	216
<b>Kishkin A. A., Khakhlenkov A. V., Ermakov M. A., Abdullaev M. U., Potes D. V.</b> Modeling of operating modes of a convective liquid cooling system .....	218
<b>Khodenkov A. A., Khodenkova E. V.</b> Measuring complex for testing of heat-power plants .....	221
<b>Khodenkov A. A., Melkozerov M. G.</b> Experimental measuring complex for tests of power plants .....	223
<b>Chernenko V. V., Chernenko D. V.</b> Hydraulic calculation unit in the mathematical model of air separation plant evaporator-condenser .....	225
<b>Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Delkov A. V., Shilkina M. O.</b> Experimental research of the efficiency of work of microturbine power units .....	228
<b>Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Delkov A. V., Shilkina M. O.</b> Numerical simulation of steam microturbine units .....	231

Section

“TECHNOLOGY IN ROCKET PRODUCTION”

<b>Vavilin V. A., Levko V. A., Yakubovich I. O., Pokushko M. S., Kulkov A. A.</b> The design and manufacture of special axial tool for making molds of a complex configuration .....	234
<b>Vasil'ev E. N.</b> Calculation of heat transfer characteristics of finned wall of heat exchanger .....	237
<b>Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., Korkhova M. I.</b> An experimental model of thermal storage with phase transformation .....	239
<b>Volodin A. Yu., Savin D. I., Bagrova A. V., Yakubovich I. O.</b> Preliminary testing of the axial cutting tool .....	242
<b>Vorozheykin V. A., Litvinchuk A. Ju.</b> Research of the influence of vibration of a technological system on the quality of processing a wafer background of products of rocket and space technology .....	244
<b>Golubovskaya N. O., Kretinin S. I.</b> Automating deep anodizing process of details from aluminum alloys .....	247
<b>Dorofeeva E. S.</b> Testing a special mill for treating titanium alloys .....	249
<b>Zaytseva T. S., Ershov D. V.</b> Study of properties of modified binder phenol-formaldehyde smol for binder composite materials used in rocket science .....	252
<b>Kimm I. E., Sarapulov K. B.</b> Capacitive equipment using rocket and space technologies .....	254
<b>Krasilova E. V., Pikulin S. A., Girn A. V.</b> Manufacturing technology of composite tube connection with metal adapter .....	257

<b>Lvov V. A.</b> Elektron beam welding of large rocket products at the modern level .....	260
<b>Matchin I. E.</b> Oxidation titanium alloys in vacuum .....	262
<b>Okshina O. V., Voronchikhin V. D.</b> Prospects for the use of low-molecular polyester ketone as a technological additive for elastomer compositions .....	264
<b>Pikulin S. A., Krasilova E. V., Girn A. V.</b> Calculation of optimal size of the part of the metal-composite joint .....	266
<b>Preda I. S., Lobastov I. S.</b> Technological optimization of cycles of manufacturing of spherical heads with a waffle background .....	269
<b>Savin D. I., Yakubovich I. O.</b> Machining features of molybdenum parts .....	271
<b>Samoshkin V. M.</b> Features of operational stability control of parameters of rocket and space technology .....	274
<b>Samoshkina P. Y.</b> Features of testing elements of pipelines .....	277
<b>Sveredyuk V. V., Voronchikhin V. D., Trushkina T. V.</b> Research of butadiene-nitrile rubbers as a polymeric basis for current conductive adhesive compositions .....	279
<b>Trushkina T. V., Sveredyuk V. V., Shirokov I. B.</b> Application of a multifunctional heat-shielding coating by an automated method .....	281
<b>Tsuglenok M. N.</b> Control of the management program in the vericut environment for machining centers in the production of RCT parts .....	283
<b>Tsuglenok M. N., German A. S.</b> Software for checking the governing program for CNC machines .....	285
<b>Shevchenko T. A.</b> High-temperature gas-static treatment of parts of turbopump assembly .....	287
<b>Shestakov I. Y., Khilyuk A. V., Slepneva N. G., Babkina L. A.</b> X-ray phase analysis of solid waste of chemical milling of parts of aircraft from aluminum alloys .....	289
<b>Shirshov E. O., Sugak E. V.</b> Solution of problems of the work area when measuring volumes in missile building .....	291

## Section

**“CONTROL SYSTEMS, SPACE NAVIGATION  
AND COMMUNICATION SYSTEMS”**

<b>Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Chyurikova T. I.</b> The wideband filter based on microstrip multimode resonator .....	294
<b>Vdovin N. E., Oleynikov E. P.</b> Passive satellite control systems .....	296
<b>Grinberg G. M., Egorova P. G., Nurullaev N. M.</b> Experimental research of the applicability of the I298n driver to control d82 motor .....	298
<b>Zhukov A. O., Kartsan I. N.</b> Prospects for increasing the measurement information to determine the parameters of the spacecraft' orbit .....	300
<b>Mizrakh E. A., Kolokhatova S. A., Soboleva T. S.</b> Analysis of the stability of a voltage stabilizer by a modified nikvist criterion .....	303
<b>Osipenko T. S., Krylov Y. V., Presnov V. N.</b> Axisymmetric dual-reflector antenna with a special profile of subreflector .....	305
<b>Pozdniakov A. A., Knyazev V. O., Malkov Y. Y., Shamunov S. A., Kiselev A. V.</b> Software-hardware star tracker test sample for in earth validation of orientation and stabilization systems .....	308
<b>Polozhentcev D. S.</b> Frequency analysis of a two-sensor control system of the control moment gyroscope electric drive .....	311
<b>Shestakov E. N., Osipenko T. S.</b> Math modeling of horn antenna parameters by measurements in near-field .....	314
<b>Shtabel N. V., Samotik L. A., Mizrakh E. A.</b> Spacecraft power system protection complex for ground tests .....	317
<b>Shurina D. A., Kovalenko A. N., Myrygin A. V., Suvorov A. G.</b> Development of a communication net between RFID system elements .....	320
<b>Shurina D. A., Kovalenko A. N., Myrygin A. V., Suvorov A. G.</b> Connection of a filling stand with rfid-system at refrigerator manufacture .....	323

Section

“SPACE AND SPECIAL-PURPOSE ELECTRONIC INSTRUMENT ENGINEERING”

<b>Vasilyev I., Klimkin O., Suntsov S., Frizorger V.</b> Power module manufacturing technology for the power supply system of spacecraft .....	326
<b>Vinogradov D. S., Kortenko A. V., Ivanyushchenko A. A., Aleksanov P. A.</b> Selection of the contactless starting system design for the ball bearings start moment measurement system .....	328
<b>Druzhinin A. A., Asochakov A. S.</b> The frequency response measuring of a power converter with a digital control system .....	330
<b>Druzhinin A. A., Asochakov A. S.</b> The measurement system of frequency responses based on the program Labview .....	333
<b>Kalyuzhnaya A. B.</b> Devices based on LTCC ceramics .....	336
<b>Lepeshkina E. S.</b> The fault tolerance problem of cryptographic systems in the composition of spacecraft onboard equipment .....	338
<b>Mironov A. A.</b> Experience in development of power supplies for radio-electronic equipment of space devices .....	340
<b>Nedorezov D. A., Krasnenko S. S.</b> Development of test methods onboard electronic equipment of spacecrafts based on fault injection .....	342
<b>Sherstennikova G. N., Shaura A. S.</b> Calculation radiation absorbed dose at component locations taking in to account real spacecraft and equipment shielding .....	344

Section

“ELECTRONIC COMPONENT BASE OF SPACE SYSTEMS”

<b>Gorbas A. V., Konkova N. A., Kuzmin V. V., Ponomarev A. A.</b> The protective–identification technology of chemical marking military and space function electronic components .....	348
<b>Gorbachev I. P., Korbankova T. Yu., Kulibaba A. Ya., Sashov A. A.</b> Methods of detecting counterfeit electronic parts signs .....	349
<b>Korolev A. V., Mouallem W., Berdichevsky K. V.</b> New european FPGA for spacecraft onboard equipment .....	351
<b>Kulibaba A. Ya., Sashov A. A., Sukonkin M. K., Shtukarev A. Yu.</b> Analysis of influence of incoming inspection and additional tests on the reliability of the electrical, electronic and electromechanical (EEE) parts .....	352
<b>Kulibaba A. Ya., Sukonkin M. K., Shtukarev A. Yu., Yushin O. V.</b> A method for electrical, electronic and electromechanical (EEE) parts storage life assessment based on parameter degradation analysis .....	355
<b>Kulikov A. V., Meshkovskii I. K., Efimov M. E., Volkovskii S. A.</b> An optoelectronic interrogation module of fibre-optic sensors for temperature, vibration and acoustic control in space systems .....	358
<b>Masich I. S., Fedosov V. V., Kraeva E. M.</b> Application of logical decision rules for classifying EEE-parts .....	361
<b>Orlov V. I., Shkaberina G. Sh., Rozhnov I. P., Popov V. P., Kazakovtsev L. A.</b> Application of greedy heuristic algorithms for the problem of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices .....	363
<b>Orlov V. I., Fedosov V. V., Golovanov S. M.</b> The application of an iterative algorithm of maximization silhouette criteria for the formation of homogeneous groups of electronic components .....	366
<b>Pobozhenskii S. A., Shiryaev D. V.</b> Deep learning software and hardware system for automation of the analysis of integral microcircuits structure .....	369
<b>Rozhnov I. P., Kazakovtsev L. A., Orlov V. I., Lapunova E. V.</b> Application of a new approach for the development of automatic grouping algorithms for the forming of an electronic component base with special quality requirements .....	371
<b>Starcev V. N., Semenov A. V.</b> System for control of reliability static random access memory based on properties of physical unclonable function monitoring of static ram, using properties of physically uncloneable functions .....	373
<b>Trifanov V. I., Karelina E. A., Trifanov I. V.</b> Calculation of drawing force in the manufacture of waveguide pipes .....	375
<b>Trifanov V. I., Sukhanova O. A., Trifanov I. V.</b> The ways to protect spacecraft from space radiation .....	377



## Section

## “CONTROL AND TESTING OF AEROSPACE EQUIPMENT”

<b>Baranov M. E., Kravchenko A. V., Lapko R. V.</b> The problem of obtaining reliable estimates of performance in conducting tests of rocket and space technology and their solutions .....	380
<b>Malyshenko A. M., Belyaev A. S.</b> Solar panel wings weightlessness implementability estimation in a robocar-based ground testing .....	383
<b>Pustobaev M. V., Shmatkov A. V., Zubrenkov B. I., Grabilin A. O., Derishev D. V.</b> Fixture selection specifics for pyroshock testing of large space onboard equipment .....	386
<b>Pchelkina T. A., Karelina E. A., Snezhko A. A.</b> Features of ensuring the unity of linear-angular measurements .....	391
<b>Sineva M. V., Voevodkin G. S., Vagapova N. T.</b> The universal method to evaluate electric parameters of multi-junction solar cells .....	393
<b>Ustimenko V. V., Mikhaylenko L. A.</b> Simulation of thermal vacuum tests in SimInTech .....	395
<b>Frolova I. V., Shpet N. A., Soldatov A. I.</b> Data processing algorithms using phased antenna arrays .....	398
<b>Shabalina D. A., Zirnova E. A.</b> Control of metrological characteristics at certification of breakdown installation .....	400
<b>Shurinova D. A., Suvorov A. G., Kovalenko A. N., Myrygin A. V.</b> Development of a test bench for checking the calibration of rocket fuel sensors .....	402

## Section

## “SMALL SPACECRAFT: PRODUCTION, EXPLOITATION AND CONTROL”

<b>Baiteryakov A. V., Shaterkin N. S., Matveev V. V., Sadykov A. R.</b> Development of advanced command-measuring system equipment for small spacecraft of CCSDS standard .....	405
<b>Karyagin A. A., Oleynikov E. P.</b> Automatic landing system unmanned aerial vehicles .....	408
<b>Milenin D. V., Oleynikov E. P.</b> Current state and prospects for the development of small spacecraft .....	410
<b>Repin A. A., Oleynikov E. P.</b> Operation and advantages of small spacecraft .....	412

## Section

## “USAGE OF EARTH’S REMOTE-SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND MODELLING”

<b>Bakhtina A. V.</b> Information system analysis of remote sensing data on the basis of nonparametric decision algorithms .....	415
<b>Goncharov A. E., Yuronen Yu. P.</b> Interpretation of sidescan sonar imagery of the upper and middle reaches of the river Yenisei .....	417
<b>Goncharov A. E.</b> Sidescan sonar deployment techniques for the river Yenisei .....	420
<b>Im S. T., Lee V. G.</b> Darkneedle stand closure dynamics in Central Siberia in the XXI century .....	423
<b>Im S. T., Lee V. G.</b> A GIS-based approach to analyze the northern forest border .....	425
<b>Kashkin V. B., Rubleva T. V., Shelyapina K. V.</b> Features of atmospheric dynamics in the stratosphere of the southern hemisphere spring 2014–2015 according to OMI/URA .....	427
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Select the number of intervals discretizing the range of values of a multidimensional random variable .....	430
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Bandwidth selection in multidimensional kernel estimates of probability density at statistical data of large volume .....	432
<b>Makarov D. S., Kharlamov D. V., Sorokin A. V.</b> Radioscopy of forest by L1 band signals of navigation satellites .....	434
<b>Platonova Yu. V., Komissarova O. Yu.</b> Remote methods for environmental monitoring of snow cover pollution .....	436
<b>Tuboltsev V. P., Avdeenok V. L.</b> Nonparametric algorithm of automatic classification and its application in the processing of remote sensing data .....	438

Section

“EXPLOITATION AND RELIABILITY OF AIRCRAFT”

<b>Akzigitov A. R., Dmitriev D. V.</b> Analysis of TCAS II air collision avoidance system and its TA/RA modes .....	442
<b>Afanaseva A. V., Gilmanov D. S., Balaganskiy R. V.</b> Assessment of technical risks of the life-reliability system of the life cycle of the Mi-8 helicopter .....	444
<b>Boyko O. G., Legkova T. A.</b> Study of the process efficiency of resources delivery planning to Vankor field by airlift .....	446
<b>Leonov S. V., Tkachenko S. A., Kolesnikov R. S., Boiko O. G.</b> Research of the efficiency of using the Yak-42 plane according to the data of the KrasAvia airlines .....	448
<b>Ogorodnikova Y. V., Lukasov V. V., Majnasheva S. O.</b> Corrosion damage to civil aviation airframe structure .....	451
<b>Petlinsky D. E., Oleynikov E. P.</b> The use of UAV in the modern world .....	453
<b>Pisarev N. S., Statsenko N. I., Akzigitov R. A.</b> Development of an integrated security improvement system .....	455
<b>Sayapin A. V., Gerasimova D. S.</b> Alleged disasters of 2025 .....	458
<b>Tkachenko S. A., Leonov S. V., Syakov E. E., Boiko O. G.</b> To the question of enhancement of technological process of maintenance of the fuel system of the An-24 airplane .....	460
<b>Filippov A. A., Oleynikov E. P.</b> History and prospects of application unmanned aerial vehicle .....	463

Section

“TECHNOLOGY AND MECHATRONICS IN MACHINE BUILDING”

<b>Bolshakov R. S., Eliseev S. V.</b> Estimation features of dynamical condition of suspension object system at vibration disturbance .....	466
<b>Vasileva E. K., Novoselsky N. K., Sysoev A. S.</b> Making accuracy in abrasive-extrusion processing .....	469
<b>Deunezheva M. A., Terina E. A., Tutushckin A. K., Terin A. M., Fadeev A. A.</b> Application of the risk-oriented approach in tests of the perspective drive of a wheel of the aircraft .....	472
<b>Evseev F. D., Gromakov A. I., Mihnev M. M.</b> Development of technologies of casting items with the use of additive technologies .....	474
<b>Eliseev S. V., Kuznetsov N. K., Eliseev A. V.</b> Interpartial connections in the formation of dynamic states of mechanical oscillatory systems with two degrees of freedom .....	476
<b>Zaitsev R. V., Skachkov I. A., Zlobin S. K.</b> The use of low-temperature soldering in the manufacture of waveguide-distribution paths of communication spacecraft .....	478
<b>Zaitsev R. V., Gusev V. U., Ananev V. V., Skachkov I. A., Zlobin S. K.</b> Flexible waveguide section in the waveguide systems and distribution paths of spacecraft communication .....	480
<b>Zakharova N. V., Mal'ko L. S., Zakharov L. S.</b> Increasing the durability of worm gear with curved profile by applying wearproof coating .....	482
<b>Maksimchuk M. M., Panaskov A. O., Shumilina Y. E., Serafimov M. N.</b> 3D printer with automatic change of the working head .....	485
<b>Mal'ko L. S., Sutyagin A. V., Sukhanova O. A., Zakharova N. V.</b> Formation gear contact surfaces of globoid cylindrical pairs with convex-concave profiles of paired links .....	487
<b>Panas'kov A. O., Shumilina Y. E., Makismchuk M. M.</b> Technical vision of autonomous mechatronic systems .....	489
<b>Semeinykh Iu. A., Dvirniy V. V.</b> Components of systems of heating of the heat mode of elements of nodes, units of space vehicles while ground tests .....	491
<b>Skachkov I. A., Ananev V. V., Zaitsev R. V., Gusev V. Y., Zlobin S. K.</b> Modernization of orbital welding head of non-turn heat pipe joints .....	493
<b>Trifanov V. I., Pchelkina T. A., Trifanov I. V.</b> Technological possibilities of anode-abrasive polishing of pipes of a small diameter .....	495
<b>Tutushkin A. K., Therin A. M., Ramenskaya E. V., Filippov Y. A.</b> The kinematics of the process of cutting pipes .....	496
<b>Fadeev A. A., Chestakov I. Y., Kirbizhekova V. V., Chestakov V. I., Yahontov M. M.</b> Manage the installation of electrobraided metals .....	498
<b>Filippov K. Yu., Spicyn I. N., Ramenskaya E. V., Filippov Yu. A.</b> Experimental determination of tooth feed during pipe cutting .....	501

<b>Filippov K. Yu., Ramenskaya E. V., Ramenskiy V. V., Filippov Yu. A.</b> Sharpening of disk saws with planar cutting teeth .....	503
<b>Filippov K. Yu., Ramenskiy V. V., Pronin A. V., Yankovskaya N. F.</b> Surface texture milling parts KA .....	505
<b>Cherepanov A. I., Bermeshev T. V., Zhereb V. P., Taskin V. Yu.</b> Fast crystallized ligatures as master alloys for Ak12 alloy .....	507
<b>Shumilina Y. E., Panas'kov A. O., Maksimchuk M. M.</b> Sealing of the output shaft of the motors of the underwater mechatronic module .....	509
<b>Shcherbakova A. V., Savenkov A. A., Rublevskaja E. V., Sutyagin A. V., Maslova O. V.</b> Influence of temperature and time before pressing on item thickness .....	511

## Section

## “MECHANICS OF SPECIAL SYSTEMS”

<b>Gorbenko T. I., Gorbenko M. V., Enkov M. O.</b> Calculation of the mechanical gripper of an industrial robot .....	515
<b>Eresko T. T., Kukushkin E. V., Sherstyukov V. G.</b> Two-cascade refrigerating unit for cardan transmission tests in cold .....	517
<b>Eresko T. T., Ermienko I. Yu., Ermienko N. A.</b> Study of stresses in the design of forks of cardan gears .....	520
<b>Zhubrin V. G., Eresko A. S., Eresko S. P.</b> Modernization of the hydraulic drive of the rotary platform of the earth machine based on dynamic analysis .....	523
<b>Ivanov Yu. F., Klopotov A. A., Eresko S. P., Petrikova E. A., Lopatin I. V.</b> Multi-cycle surface alloying of silumin by titanium .....	526
<b>Klimov A. A., Struchkov A. V.</b> Results of experimental researches of wear of the brake pad for locomotive .....	529
<b>Kukushkin S. V., Chabukashvili T. G., Chaykina K. A., Sherstyukov V. G.</b> About climate tests of power transmissions .....	531
<b>Kustov A. V., Kornev V. M.</b> Dynamics of steam bubble formation at a vortex rectification step .....	533
<b>Tsaplin P. V., Eresko S. P.</b> Theoretical justification of the technology of calibration of particle boards by the combined method .....	536

## Section

## “NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN AEROSPACE INDUSTRY”

<b>Begisheva O. B., Bandurina O. N., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N.</b> Magnetic resistance and magnetoimpedance in the paramagnetic area in solid solutions $\text{Lu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ .....	540
<b>Gerasimov V. S., Ershov A. E., Bikbaev R. G., Rasskazov I. L., Karpov S. V.</b> Surface lattice resonances in hybrid plasmon-photon nanostructures .....	542
<b>Gerasimov V. S., Ershov A. E., Bikbaev R. G., Rasskazov I. L., Karpov S. V.</b> Hybrid electromagnetic field modes in periodic aluminium nanostructures .....	545
<b>Danilenko E. G., Nikitina A. E., Safronova A. A., Telegin S. V.</b> Study of the influence of functional additives in the composition layer of the radiation screen .....	547
<b>Ershov A. E., Gerasimov V. S., Gavrilyuk A. P., Karpov S. V.</b> Dynamic photomodification of disordered aggregates of plasmonic nanoparticles .....	550
<b>Zaichko K. V., Ivlenkov D. V., Ilvutikov S. A., Sharangovich S. N.</b> Application of point sensors with fiber bragg lattice for temperature control in multilayered printed board .....	552
<b>Zakomirnyi V. I., Gerasimov V. S., Ershov A. E., Karpov S. V.</b> Narrow resonances in periodic dielectric structures with finite size .....	554
<b>Konovalchikov A. V., Lapukhin E. G.</b> The program for determining the period of time-spaced measurements and data visualization .....	556
<b>Kostyukov A. S., Ershov A. E., Gerasimov V. S., Karpov S. V.</b> Therapy of malignant tumors by means of magnetic nanoparticles activated in a low-frequency magnetic field .....	558
<b>Kretinin V. V., Aplesnin S. S.</b> Ir-range photoinduced diode effect in the $\text{BiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$ thin films .....	561

<b>Loginov Y. Y., Mozzherin A. V., Brilikov A. V.</b> Computer simulation of the structural defects formation in cadmium telluride .....	563
<b>Masyugin A. N., Begisheva O. B.</b> Magnetoelectric effect and IR spectroscopy of $Ce_3Fe_5O_{12}$ films .....	565
<b>Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Mironenko V. V., Filipson G. Yu.</b> Electrical properties in semiconductors $Tm_xMn_{1-x}S$ .....	567
<b>Tambasov I. A., Volochaev M. N., Fedotov V. A., Tambasova E. V., Gornakov M. O.</b> Synthesis of thin nanocomposite Co-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> films with controlled size of Co nanoparticles .....	569
<b>Utyushev A. D., Ershov A. E., Gerasimov V. S., Rasskazov I. L., Karpov S. V.</b> Engineering novel optical high-Q nanoparticle array filters for a wide range of wavelengths .....	571
<b>Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Rybina U. I., Yukhno M. Yu.</b> Thermionic current and the thermopower in $Tm_xMn_{1-x}S$ .....	573
<b>Shcheglova M. S., Balashov Yu. Yu., Volochaev M. N.</b> Fast Fourier transform application for filtration and analysis of high resolution electron microscopy images .....	575

Section

“CONTINUUM MECHANICS (GASDYNAMICS, HYDRODYNAMICS, THEORY OF ELASTICITY AND THEORY OF PLASTICITY, REOLOGY)”

<b>Avtonomov N. N., Tololo A. V.</b> Use of a titanium ball to indente the research material .....	579
<b>Andreev V. K., Stepanova I. V.</b> On unidirectional motion of binary mixture .....	581
<b>Varygina M. P., Smolekho I. V.</b> Numerical modeling .....	583
<b>Vyatkin A. V., Kuchunova E. V.</b> Parallel realization of nummerical method for three-dimensional modeling of viscous heat-conducting gas motion near tube .....	585
<b>Belolipetskii V. M., Genova S. N.</b> On the numerical model of the penetration of a turbulent layer in nonlinearly stratified fluid .....	587
<b>Gileva L. V., Karepova E. D.</b> The application of special hermite finite elements to the 3d poisson equation .....	589
<b>Eremin N. V.</b> Model evaluation of strength of composite material based on the initial damage .....	591
<b>Efimova M. V.</b> The problem of the small differences of the convective two-layer flow with the account of the energy of interphase heat transfer .....	593
<b>Kashkin V. B., Rubleva T. B., Matsulev A. N., Simonov K. V.</b> Interpretation of grace system data for solving geodynamic monitoring tasks .....	595
<b>Kondratov A. S.</b> Semi-Lagrange method of numerical solution of the continuity equation .....	598
<b>Martyushev S. G.</b> Analysis of the dependence of stresses and accelerations in the onboard equipment of a spacecraft on resonant frequencies under shock loads .....	600
<b>Matveev A. D.</b> Construction of multigrid finite elements to calculate cylindrical shells based on generating finite elements .....	603
<b>Nemirovsky Y. V., Feodorova N. A.</b> Examples of solving inverse problem for fiber-laminated strutures with curvilinear reinforcement .....	606
<b>Peretokin S. A., Mironov V. A., Simonov K. V.</b> Comparison of software for probabilistic seismic hazard analysis based on the Monte Carlo method .....	608
<b>Petrakov I. E.</b> On the refined equation of bending a thin elastic rod .....	611
<b>Sabirov R. A.</b> To calculating a deformed state of a bended flat curved rod by the Ritz method .....	613
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Using conservation laws to solve the problem of viscoplastic fluid flow .....	616
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Method for solving dynamic equations of ideal plasticity .....	617
<b>Smolekho I. V.</b> Numerical analysis of the Fréedericksz effect based on the acoustic approximation of a liquid crystal model .....	619
<b>Shan'ko Yu. V.</b> On solutions with functional arbitrariness of the inhomogeneous acoustics equation .....	621

## Section

## “CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES”

<b>Andreeva A. V., Bobrov P. S., Lyubyashkin A. V., Tovbis M. S.</b> Proof of a structure of previously synthesized 1-n-propyl and 1-isopropyl-substituted 4-aminopyrazoles by <sup>1</sup> h nmr spectroscopy and chromato-mass spectrometry .....	624
<b>Andreeva A. V., Bobrov P. S., Lyubyashkin A. V., Tovbis M. S.</b> Synthesis of new 4-aminopyrazoles acetyl derivatives .....	627
<b>Antishin D. V., Miroshnichenko A. A., Krasnov M. S., Tolmacheva A. E.</b> Study of eutectic systems of multicomponent energy-intensive materials .....	630
<b>Bobrov P. S., Andreeva A. V., Lyubyashkin A. V., Suboch G. A.</b> Study of the interaction of 3-hydrazinochinoxalin-2 (1h) -one with isonitrozobenzoylacetone .....	633
<b>Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V., Golubtsova O. A., Belova E. A., Lomachko A. E.</b> Thermal decomposition catalysis of 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane .....	636
<b>Kurochkina E. Y., Selina S. N., Gavrilova N. A., Suboch G. A.</b> Synthesis of n-3-nitrobenzylidenquinolin-5-amines derivatives .....	639
<b>Persidskaya D. I., Kukushkin A. A., Root E. V.</b> Restoration of azo compounds as an alternative method for producing 4-amino-3-methoxymethyl-5- (4-bromphenyl) -1h-pyrazol .....	641
<b>Slyshchenko E. P., Vagapova N. T.</b> Selection of photolithography modes on domestic photo resistors in the technology of solar cells production .....	644
<b>Snezhko A. A., Kashapova N. R., Vasil'eva E. K., Vorob'eva Ju. I., Jemilbekova Z. Je.</b> The relationship of the nuclear structure with the properties of chemical elements .....	646
<b>Sorokin I. V., Korotkikh A. G.</b> The study of the activity parameters of metal powders aluminum, boron, borides of aluminum and titanium .....	649
<b>Usoltseva A. V., Gavrilova N. A., Suboch G. A.</b> Interaction of 5-nitroso-8-quinolinol with tetramethylenediamine .....	652